

Grado Universitario en Ingeniería en Tecnologías  
Industriales  
2018-2019

*Trabajo Fin de Grado*

“Evaluación de un micro gasificador de  
biomasa adaptado a una estufa de leña  
para aplicación en comunidades rurales  
de México”

---

Olmo Fierros Peraza

Tutor/es

Antonio Soria Verdugo

Omar Masera Cerutti

Leganés, 2019



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento - No Comercial - Sin Obra Derivada**



## RESUMEN

Muchas familias de las comunidades rurales de México utilizan aún fogones de leña como principal dispositivo para la cocción de alimentos. Estos fogones, además de emitir diversos agentes de efecto invernadero a la atmósfera, como metano o dióxido de carbono, son también emisores de gases altamente perjudiciales para la salud como el monóxido de carbono. Así pues, el estudio y mejora de nuevos dispositivos cobra especial importancia de cara a mejorar la vida de muchas personas y también para reducir el impacto del efecto invernadero. Numerosos estudios se realizan actualmente en este campo, aportando diseños y dispositivos de lo más variados y que abarcan una amplia gama de precios, desde dispositivos más caros pero altamente eficientes en la combustión, hasta otros de mayor acceso para familias con recursos más limitados.

Este trabajo trata de aportar un análisis de la combinación de dos dispositivos de combustión de biomasa económicos, con el objetivo de probar su eficiencia térmica y su posible adaptación para el uso cotidiano en la práctica de cocción de alimentos. Se utiliza para ello una estufa Patsari tradicional combinada con un micro gasificador TLUD de tiro natural instalado en uno de los comales secundarios de la estufa. Para llevar a cabo el análisis de eficiencia térmica se utilizan diversos combustibles, entre los que destacan pellets, astillas y tecata. Para ello, algunos combustibles sufren un tratamiento previo de secado y determinación del poder calorífico para posteriormente realizar pruebas de tipo WBT modificado.

**Palabras clave:** Ecotecnologías, gasificadores, emisiones, comunidades indígenas, estufas mejoradas





## ABSTRACT

Many families in the rural communities of Mexico still use firewood stoves as the main device for cooking food. These stoves, in addition to emitting various greenhouse agents into the atmosphere, such as methane or carbon dioxide, are also emitters of highly harmful gases such as carbon monoxide. Thus, the study and improvement of new devices is particularly important in order to improve the lives of many people and also to reduce the impact of the greenhouse effect. Several studies are currently conducted in this field, providing designs and devices of many kinds and covering a wide range of prices, from more expensive devices but highly efficient in combustion, to others of greater access for families with more limited resources.

This study tries to provide an analysis of the combination of two economic biomass combustion devices, with the aim of testing their thermal efficiency and their possible adaptation for daily use in the practice of cooking. A traditional Patsari stove combined with a natural draft TLUD micro gasifier installed inside the stove is used for this purpose. To carry out the thermal efficiency analysis various fuels are used, among which are pellets, chips and tecata. For that purpose, some fuels undergo a previous treatment of drying and determination of the calorific value to subsequently carry out tests of the modified WBT type.

**Keywords:** Ecotechnologies, gasifiers, emissions, indigenous communities, improved stoves



## DEDICATORIA

Deseo expresar mi agradecimiento a todas las personas que me han ayudado y asesorado durante este trabajo, así como a aquellos que me han apoyado durante el recorrido.

*Agradezco por el apoyo y las facilidades otorgadas del Fondo de Sustentabilidad Energética a través del proyecto SENER CONACYT 2014 246911 Clúster de Biocombustibles Sólidos para la Generación Térmica y Eléctrica.*

*Agradezco al personal del Laboratorio de Bioenergía y de la Unidad de Ecotecnologías, especialmente a los técnicos académicos M. en C. René D. Martínez Bravo y M. I. Alfredo F. Fuentes Gutiérrez por el soporte técnico para el desarrollo de la experimentación, insumo necesario para llevar a cabo esta tesis.*

*Agradezco a mis tutores, el Dr Antonio Soria y el Dr Omar Masera, por su amable ayuda y paciencia frente a mis dudas y por su orientación para enfocar este proyecto.*

*Agradezco al Dr Víctor Ruiz su orientación a la hora de llevar a cabo las pruebas. Y, por supuesto, a los técnicos del laboratorio Dante, Juan Carlos y Sarai, sin la ayuda de los cuales no podría haber realizado las pruebas experimentales con éxito.*

*También me gustaría agradecer a todos los profesores de la Universidad Carlos III y a todos mis compañeros, de los que he aprendido todo lo necesario para llegar hasta aquí. Mención especial para mi compañero Rodrigo Luque, ya que es el que siempre me ha aportado esas dosis de disciplina y tesón tan importantes en esta carrera de fondo.*

*Finalmente, me gustaría agradecerle a mi familia el apoyo incondicional que me ha mostrado en este tiempo.*



## ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN. . . . .	1
1.1. Marco regulador . . . . .	1
1.2. Motivación del trabajo . . . . .	1
1.3. Objetivos . . . . .	7
2. ESTADO DE LA CUESTIÓN . . . . .	8
2.1. Biocombustibles . . . . .	8
2.2. Emisiones . . . . .	10
2.3. Estufas mejoradas . . . . .	14
2.4. Micro gasificadores . . . . .	19
2.5. Antecedentes . . . . .	20
3. METODOLOGÍA . . . . .	21
3.1. Dispositivo . . . . .	21
3.2. Adaptación . . . . .	22
3.3. Test WBT . . . . .	24
3.4. Combustible . . . . .	25
3.5. Prámetros de estudio . . . . .	30
4. PRUEBAS EXPERIMENTALES . . . . .	32
4.1. Pruebas piloto . . . . .	33
4.1.1. Primera fase. . . . .	33
4.1.2. Segunda fase . . . . .	34
4.2. Astillas . . . . .	35
4.3. Tecata . . . . .	38
4.4. Pellets: Quercus sin corteza . . . . .	40
4.5. Pellets: Tascate con corteza . . . . .	43
5. RESULTADOS . . . . .	46
5.1. Astillas . . . . .	46
5.2. Tecata . . . . .	47
5.3. Pellets: Quercus sin corteza . . . . .	48

5.4. Pellets: Tascate con corteza . . . . .	49
5.5. Comparativa de resultados. . . . .	50
6. CONCLUSIONES . . . . .	51
7. ANÁLISIS ECONÓMICO . . . . .	52
8. RECOMENDACIONES . . . . .	54
ANEXOS . . . . .	55
A. ANEXO I: HOJA TÉCNICA (PRUEBAS PILOTO) . . . . .	56
A.1. Prueba Astillas (Primera Fase) . . . . .	56
A.2. Prueba Carbón (Primera Fase) . . . . .	57
A.3. Prueba Astillas (Segunda Fase). . . . .	58
A.4. Prueba Tecata (Segunda Fase) . . . . .	59
B. ANEXO II: HOJA TÉCNICA (PRUEBAS EXPERIMENTALES) . . . . .	60
B.1. Pruebas Astillas . . . . .	60
B.2. Pruebas Tecata . . . . .	63
B.3. Pruebas Pellets (Quercus sin corteza) . . . . .	66
B.4. Pruebas Pellets (Táscate con corteza) . . . . .	69



## ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Emisiones contaminantes por comida según el combustible, en relación con el LPG [1] . . . . .	2
1.2	Concentración atmosférica de $CO_2$ en las últimas décadas [2] . . . . .	3
1.3	Aumento de la temperatura global en relación a los niveles pre-industriales [3] . . . . .	4
1.4	Consumo global de energía 2016 [4] . . . . .	5
1.5	Índice de independencia energética de México [5] . . . . .	5
2.1	Producción global de biocombustibles [6] . . . . .	9
2.2	Procesos de combustión y gasificación [7] . . . . .	12
2.3	Contenido del material particulado de distintos tipos de biomasa [8] . . .	13
2.4	Fogón de tres piedras . . . . .	14
2.5	Consumo específico de energía de los diferentes dispositivos [9] . . . . .	15
2.6	Emisiones de agentes de efecto invernadero de los diferentes dispositivos [9] . . . . .	16
2.7	Estufa Patsari . . . . .	17
2.8	Potencia y relación de trabajo de las diferentes estufas [10] . . . . .	18
2.9	Esquema del funcionamiento de un micro gasificador [7] . . . . .	19
3.1	Micro gasificador . . . . .	21
3.2	Medidas del micro gasificador . . . . .	22
3.3	Labores de remodelación en la estufa . . . . .	23
3.4	Abertura lateral . . . . .	23
3.5	Horno de secado . . . . .	26
3.6	Calorímetro . . . . .	28
3.7	Balanza electrónica . . . . .	28
4.1	Pruebas experimentales . . . . .	32
4.2	Prueba piloto en el comal principal . . . . .	34
4.3	Prueba piloto en el comal secundario . . . . .	35



4.4	Duración de la fase de alta potencia en las pruebas con astillas . . . . .	36
4.5	Perfil de temperaturas de las astillas . . . . .	36
4.6	Consumo específico de las astillas . . . . .	37
4.7	Duración de la fase de alta potencia en las pruebas con tecata . . . . .	38
4.8	Perfil de temperaturas de la Tecata . . . . .	39
4.9	Consumo específico de la tecata . . . . .	40
4.10	Duración de la fase de alta potencia en las pruebas con Pellets (Quercus sin corteza) . . . . .	41
4.11	Perfil de temperaturas de los pellets (Quercus sin corteza) . . . . .	41
4.12	Consumo específico de los pellets (Quercus sin corteza) . . . . .	42
4.13	Duración de la fase de alta potencia en las pruebas con Pellets (Táscate con corteza) . . . . .	43
4.14	Perfil de temperaturas de los pellets (Táscate con corteza) . . . . .	44
4.15	Consumo específico de los pellets (Táscate con corteza) . . . . .	45
5.1	Resultados Astillas . . . . .	46
5.2	Resultados Tecata . . . . .	47
5.3	Resultados Pellets (Quercus sin corteza) . . . . .	48
5.4	Resultados Pellets (Táscate con corteza) . . . . .	49
5.5	Resultados Finales . . . . .	50



## ÍNDICE DE TABLAS

2.1	Características de los principales tipos de biomasa forestal [11] . . . . .	10
3.1	Humedad de las astillas . . . . .	26
3.2	Humedad de la tecata . . . . .	27
3.3	Poder calorífico de las astillas . . . . .	29
3.4	Poder calorífico de la tecata . . . . .	29
3.5	Características de los combustibles . . . . .	29
4.1	Primera fase de pruebas piloto . . . . .	33
4.2	Segunda fase de pruebas piloto . . . . .	34
4.3	Pruebas con astillas . . . . .	35
4.4	Consumos en las pruebas con astillas . . . . .	37
4.5	Pruebas con tecata . . . . .	38
4.6	Consumos en las pruebas con tecata . . . . .	39
4.7	Pruebas con pellets (Quercus sin corteza) . . . . .	40
4.8	Consumos en las pruebas con pellets (Quercus sin corteza) . . . . .	42
4.9	Pruebas con pellets (Táscatae con corteza) . . . . .	43
4.10	Consumos en las pruebas con pellets (Táscate con corteza) . . . . .	44
5.1	Resultados Astillas . . . . .	46
5.2	Resultados Tecata . . . . .	47
5.3	Resultados Pellets (Quercus sin corteza) . . . . .	48
5.4	Resultados Pellets (Táscate con corteza) . . . . .	49
5.5	Resultados Finales . . . . .	50
7.1	Horas empleadas por los técnicos . . . . .	52
7.2	Costes Totales . . . . .	53



# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. Marco regulador**

El presente trabajo se dispone de acuerdo al Real Decreto 1393/2007, de 29 de octubre, por el que se establece la ordenación de las enseñanzas universitarias oficiales y en el cual se especifica que los estudios de grado concluirán con la elaboración y defensa de un trabajo de fin de Grado. A su vez, el documento se ajusta al reglamento de organización de la asignatura Trabajo de Fin de Grado para los Grados de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid aprobado por la Junta de la Escuela en sesión de 6 de noviembre de 2014 y modificado en sesión de 29 de noviembre de 2016.

Además, el presente estudio se ha efectuado en colaboración con la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) Campus Morelia, conforme al Programa de Voluntariado Internacional de las Universidades Públicas de la Comunidad de Madrid 2018. Concretamente, el proyecto está comprendido dentro del Clúster de Biocombustibles Sólidos (BCS) del Laboratorio de Bioenergía, en el Instituto de Investigación en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES) y está financiado por el Fondo de Sustentabilidad Energética a través del proyecto SENER CONACYT 2014 246911 Clúster de Biocombustibles Sólidos para la Generación Térmica y Eléctrica.

Las pruebas experimentales se han realizado de acuerdo a la regulación estatal en las instalaciones del Laboratorio de Innovación y Evaluación de Estufas de Biomasa (LI-NEB) y con la colaboración del Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada (GIRA).

## **1.2. Motivación del trabajo**

En pleno siglo XXI, 1100 millones de personas en el mundo no tienen acceso a la electricidad y alrededor de 2800 millones carecen de métodos limpios de cocción de alimentos, utilizando para ello combustibles tales como biomasa o carbón [12]. Según el mismo informe de la IEA, el aire contaminado debido a las emisiones de dichos combustibles está relacionado con la muerte prematura de 2,8 millones de personas cada año. Se estima además que para el año 2040, la contaminación exterior del aire, causada no solo por la mala combustión fruto del cocinado de alimentos, sino también en gran medida por la producción de energía a gran escala o los automóviles, provocará la muerte prematura de alrededor de 4 millones de personas.

La biomasa comprende entre el 50 % y el 90 % de la energía primaria en países en vías de desarrollo [13] tales como China, India o algunos países africanos y latinoamericanos, donde el empleo de fogones de leña tradicionales para cocción de alimentos es

muy común. La mala eficiencia de estos dispositivos en la combustión hace que se emita una elevada cantidad de gases de efecto invernadero, como el metano y el dióxido de carbono, y otros gases perjudiciales para la salud, como el monóxido de carbono, que junto a los materiales particulados conforman los llamados PICs (Products of Incomplete Combustion). Se han relacionado estas constantes emisiones de gases intramuros con enfermedades graves como problemas cardiovasculares, obstrucción respiratoria o cáncer de pulmón [14]. En la siguiente figura se puede observar el ratio de emisiones contaminantes de los biocombustibles sólidos en comparación con el gas LPG (Liquified Petroleum Gas) o Gas de Petróleo Licuado (GPL) en español. Se puede ver que el LPG es un combustible más limpio que los derivados de la biomasa, sin embargo su precio de adquisición es más elevado, lo que lo convierte en un combustible más restrictivo para muchas familias de zonas rurales con recursos escasos.

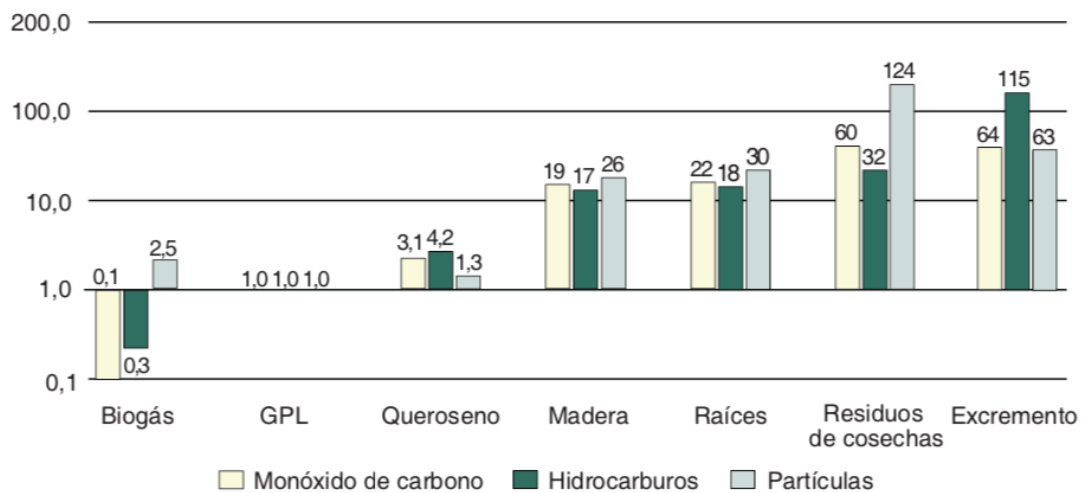


Fig. 1.1. Emisiones contaminantes por comida según el combustible, en relación con el LPG [1]

Aunque los problemas de salud no son los únicos derivados de la utilización de biocombustibles sólidos. La combustión ineficiente de dicho combustible genera no solo gases de efecto invernadero sino también partículas de carbón negro y carbón elemental que son parte importante en el calentamiento global debido a su alta intensidad de radiación [15]. De hecho, el carbón negro puede llegar a alcanzar valores de GWP (Global Warming Potential) de 680 veces el del  $CO_2$  [9]. El material particulado producto de la combustión ineficiente es también un agente relevante en materia de contaminación ambiental. Estas partículas de diversos tamaños, siendo sus diámetros más característicos de 10 y 2,5 micrómetros ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  respectivamente), pueden tener diferente repercusión al absorber o dispersar la radiación solar según su SSA (Single Scattering Albedo). Cuanto mayor es el SSA de las micro partículas, mayor es la absorción de la radiación solar y por tanto más calor emiten a la atmósfera [9]. Ludwig demostró que la combustión doméstica de biocombustibles en países en vías de desarrollo era una fuente relevante en la contaminación atmosférica, llegando a comprender entre un 7 % y un 20 % del  $CO_2$ ,

$CO$  y  $NO$  a nivel global [16]. Esto ha llevado al planeta a una situación en la que el aumento de  $CO_2$  desde el año 2000 se estima en 20 ppm (partículas por millón) por década, una tasa de crecimiento 10 veces mayor a la de los últimos 800.000 años [17] [18]. Esto concuerda con los datos arrojados por el Global Carbon Budget 2018, donde se puede ver la subida exponencial de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, que ha alcanzado en el presente año las 400 ppm (ver Fig. 1.2).

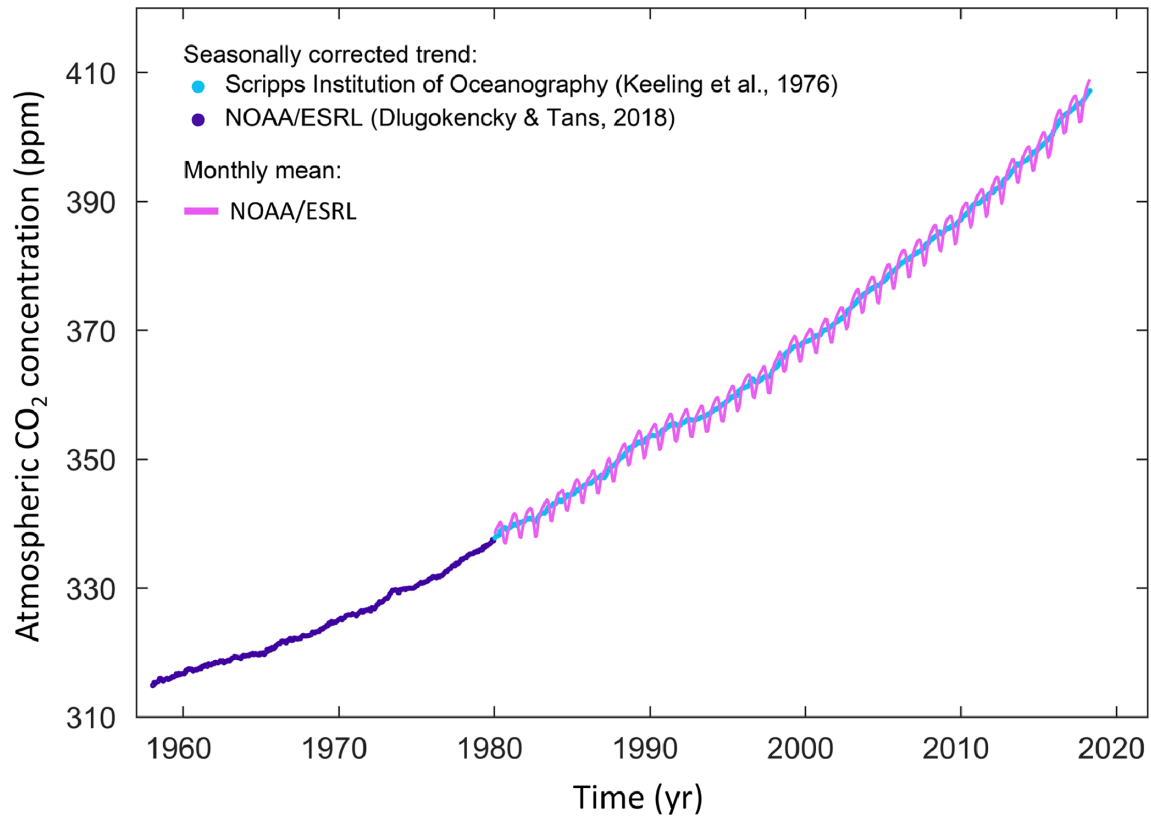


Fig. 1.2. Concentración atmosférica de  $CO_2$  en las últimas décadas [2]

Estos altos niveles de  $CO_2$  han propiciado, según el último informe del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), una subida de  $1^\circ C$  en la temperatura global del planeta sobre los niveles pre-industriales y se espera que ésta aumente hasta  $1,5^\circ C$  en las próximas décadas si no se toman medidas. El mismo informe achaca esta subida de la temperatura a los niveles de  $CO_2$  generados por la acción del ser humano y vaticina que con el ritmo de crecimiento actual de la temperatura ( $0,2^\circ C$  por década), se alcanzará ese aumento de  $1,5^\circ C$  en el año 2040 [3].

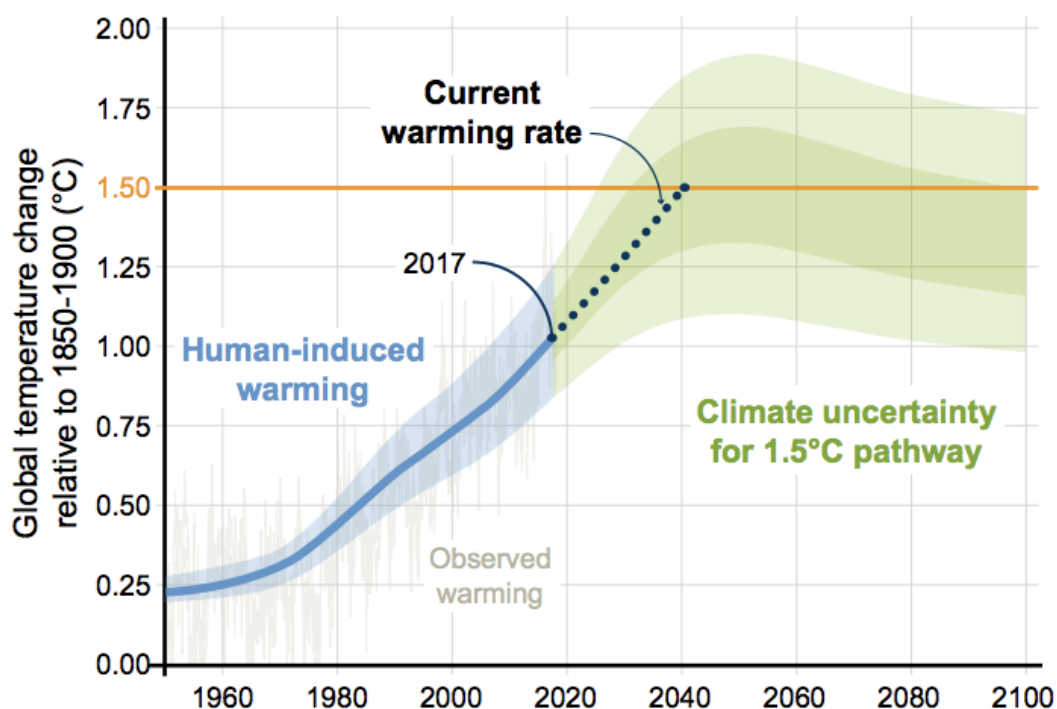


Fig. 1.3. Aumento de la temperatura global en relación a los niveles pre-industriales [3]

Como se muestra en el Global Status Report de 2018 de REN21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century), aunque el avance de las energías renovables ha sido amplio en los últimos años, el peso de los combustibles fósiles en el consumo global es aún muy grande. Sin embargo, la biomasa tradicional cuenta con un 7,8 % del total de la energía consumida a nivel mundial (Fig. 1.4), siendo la mayor alternativa no renovable a los combustibles fósiles. La promoción de los recursos renovables como sustitutos de los combustibles fósiles es la herramienta principal para hacer frente al deterioro ambiental que sufre el planeta, sin embargo no es la única. Debido a su alto coste, muchas tecnologías renovables están aún fuera del alcance de las regiones más pobres. Se hace por tanto necesario una alternativa para que el consumo de combustibles baratos como la biomasa tradicional se lleve a cabo de la forma más eficiente, minimizando de esta manera las emisiones.



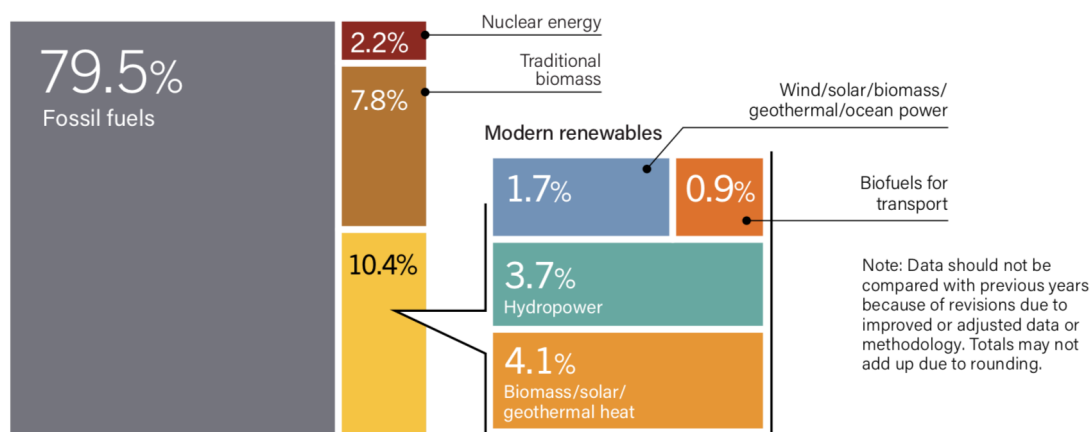


Fig. 1.4. Consumo global de energía 2016 [4]

En el caso específico de México, su dependencia energética ha crecido en los últimos años, ya que como se puede ver en la Fig. 1.5 el índice de independencia energética se encontraba ya en el 0,76 en el año 2017. El índice de independencia energética mide el grado en el que un país puede cubrir el consumo de energía derivado de su producción y como se puede ver, el índice de México ha disminuido en los últimos diez años en promedio 5,0 % [5].

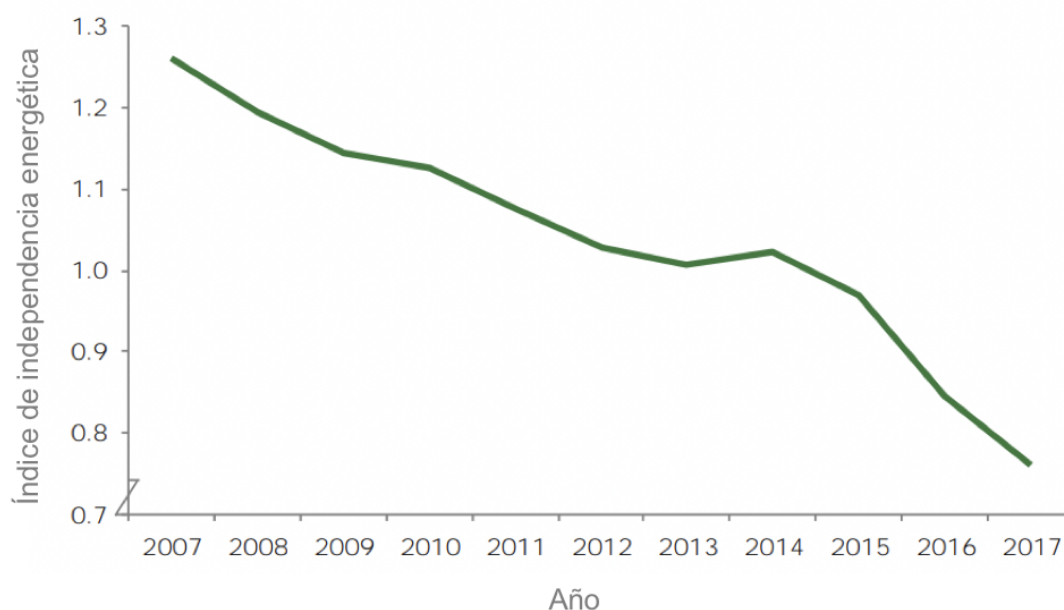


Fig. 1.5. Índice de independencia energética de México [5]

Según el mismo informe de la Secretaría de Energía de la República, la dependencia de los hidrocarburos en el país centro americano es aún muy alta, siendo éstos el 84,54 % de la producción total de energía en el país, mientras que la biomasa constituye tan solo el 5,23 % a pesar de su gran potencial en cuanto a este último combustible. Aproximadamente, el país cuenta con 2.228 PJ (peta julios) de potencial energético de la biomasa, de

los cuales 638 PJ son residuos leñosos de bosques y arbustos [19]. El resto de la biomasa comprende desde residuos de cultivos hasta biocombustibles gaseosos y líquidos (como el biodiesel). Sin embargo, la energía obtenida de los biocombustibles en el año 2017 fue tan solo de 367,18 PJ [5], aunque supone un 1,5 % más que el año anterior, se mantiene aún lejos del potencial total con el que cuenta el país. Entre 1990 y 2015, México registró un aumento de las emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero) del 54 %, lo que supone una tasa de crecimiento anual del 1,7 % [20]. De las cuales el 71 % corresponden a  $CO_2$  y el 21 % al metano.

Se estima que alrededor de 28 millones de personas en México utilizan leña en fogones abiertos para sus prácticas cotidianas de cocción de alimentos, siendo el 90 % de estos, habitantes asiduos de áreas rurales [21]. El uso de leña o residuos maderables como combustible en estas prácticas representa alrededor del 41 % de la energía total consumida en el sector residencial [22]. En estas zonas rurales existe una alternancia entre leña y LPG (Liquified Petroleum Gas) a la hora de cocinar, sin embargo, se han encontrado relaciones socioeconómicas que apuntan a que aquellos con mayores recursos pueden sustituir con mayor facilidad la leña por LPG [23]. Además, el mismo estudio apunta a que hay mayor concentración de partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2,5}$  en las emisiones intramuros de aquellas casas donde predomina la leña como combustible. Esto refleja que los problemas de salud pueden verse directamente relacionados con la situación económica. Así pues, a la problemática de la salud o la dificultad económica, según la cual muchas personas sobre todo de las zonas rurales de México no pueden costearse una transición a un combustible más ecológico y eficiente, se le une otro factor importante, el social. Los dispositivos de combustión ineficiente no solo generan emisiones de gases dañinos, sino que además consumen mayor tiempo de cocción de alimentos y al consumir mayor cantidad de combustible, obliga a las familias a invertir más tiempo en la búsqueda de la biomasa. Esto repercute especialmente en las mujeres de la familia, que son las encargadas tradicionalmente de las tareas de cocinado en las comunidades rurales del país. Se hace necesario enfrentar esta problemática mediante la mejora de dispositivos de cocción de biomasa que reduzca el impacto negativo a la vez que se adapta a las tradiciones culturales y a las posibilidades económicas de las comunidades. Se ha demostrado que las estufas de biomasa mejoradas (ICS, Improved Cookstoves) son elementos de gran relevancia ante estos problemas, ya que se muestran eficaces en la reducción de emisiones [24] en las zonas rurales, cumpliendo además de forma eficiente con la tarea a desempeñar. Uno de esos dispositivos, la estufa Patsari, se ha mostrado eficiente en su implementación en las zonas rurales del estado de Michoacán, en el centro de México, llegando a reducir el consumo de madera hasta un 50 % [22] y mitigando las emisiones de gases de efecto invernadero.

En este sentido, la Universidad Nacional Autónoma de México desarrolla una importante labor de investigación en esta línea en su Campus de Morelia. Concretamente, el Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad cuenta con el Laboratorio de Bioenergía, donde se llevan a cabo estudios que analizan el uso de la biomasa como fuente de energía y se valoran los impactos de ésta en el medio ambiente y su repercusión con respecto al cambio climático. Éste laboratorio se integra en el Clúster de Biocombustibles Sólidos (BCS) con el objetivo de evaluar diseños que optimicen el uso de este tipo de combustibles. Esta labor, asociada a la de el Laboratorio de Innovación y Evaluación de Estufas de Biomasa (LINEB) y al Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropriada (GIRA) hacen llegar el resultado de estas investigaciones a las comunidades de la zona de Michoacán por medio de una tecnología apropiada y adaptada a los consumidores.

### **1.3. Objetivos**

El objetivo primordial de este estudio será analizar el desempeño energético de una estufa Patsari con un micro gasificador adaptado en uno de los comales secundarios, con el fin de mejorar la eficiencia de combustión de la biomasa y dotar de mayor versatilidad a la estufa. Se pretende por tanto, contribuir a la mejora de los dispositivos ICS para su posterior adaptación. Al mejorar la eficiencia se pretende lograr varios objetivos. Por una parte, al conseguir una mejor combustión se reducen las emisiones de efecto invernadero y las emisiones de monóxido de carbono, tóxicas para la salud. Además, se logra también un ahorro de combustible y una disminución en el tiempo de cocinado que puede repercutir positivamente en la economía doméstica de las familias de comunidades rurales de México.

La hipótesis de trabajo sobre la que se parte es por tanto una mejora en el rendimiento de la combustión debido al flujo de aire primario y secundario controlado, lo que repercutirá por tanto en una reducción de las emisiones. De corroborarse la hipótesis, se implementaría una significativa mejora en la estufa Patsari, sin embargo ésta tendría que ser ratificada finalmente por el usuario. Se llevarán a cabo diversas pruebas y mediciones para corroborar dicha hipótesis.

## 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

### 2.1. Biocombustibles

Se denomina biocombustibles a aquellos combustibles derivados de la biomasa, es decir, de materia orgánica de la cual se extrae energía. Generalmente, los biocombustibles son clasificados en generaciones atendiendo a la materia prima o a la tecnología que es necesaria para su producción, de esta forma se puede encontrar la siguiente clasificación:

- *Biocombustibles de Primera Generación:*

Estos biocombustibles comprenden aquellos de procedencia agrícola constituidos por las partes alimenticias de las plantas (granos de maíz, aceites, frutos secos, etc.).

- *Biocombustibles de Segunda Generación:*

Son aquellos provenientes de la biomasa de residuos agrícolas y forestales que presentan una estructura lignocelulósica. Ejemplos de esto pueden ser la paja de trigo, el aserrín, la leña, etc.

- *Biocombustibles de Tercera Generación:*

Esta generación recoge a los elementos vegetales no alimenticios, entre los que se encuentran los pastos perennes o las algas, las cuales cuentan con un potencial energético 30 veces mayor que el de los cultivos en tierra debido a su gran captación de energía solar [11].

- *Biocombustibles de Cuarta Generación:*

De esta generación se tienen aún pocos datos, pues se encuentra en una fase de asentamiento teórico. Consiste en la producción de biocombustibles a partir de bacterias genéticamente modificadas, siendo la bacteria la que lleva a cabo el proceso completo.

Los biocombustibles comienzan a ser utilizados a finales del siglo XIX, paralelamente al uso de hidrocarburos como fuente de energía. Rudolf Diesel desarrolló en el año 1895 el primer motor diesel, cuyo funcionamiento estaba previsto con aceites vegetales, desarrollando las primeras pruebas con aceite de maní [25]. Henry Ford consideró el uso de etanol como combustible para sus primeros automóviles Modelo T, e incluso la Standard Oil empleó mezclas de etanol con gasolina a principios de los años veinte. Sin embargo, los altos costes de mantenimiento y de transporte sumados a la irrupción de un petróleo más barato y eficiente hicieron que los biocombustibles pasaran a un segundo plano. En la crisis del petróleo de los años setenta, debido a la necesidad de un combustible alternativo, se retoma el uso e investigación de los biocombustibles como complemento o alternativa a los hidrocarburos. Hoy en día, debido a la necesidad de sustituir los combustibles fósiles

por su gran impacto en cuanto a emisiones de  $CO_2$ , los biocombustibles son considerados uno de los exponentes de mayor éxito de las energías renovables. A pesar de emitir también  $CO_2$ , basan su energía interna en la absorción de éste antes de convertirse en combustible, por lo que se considera que el balance total de emisiones es nulo. Como se aprecia en la Fig. 2.1, la producción de biocombustibles ha crecido de forma considerable en los últimos años, alcanzando los 80 millones de toneladas.

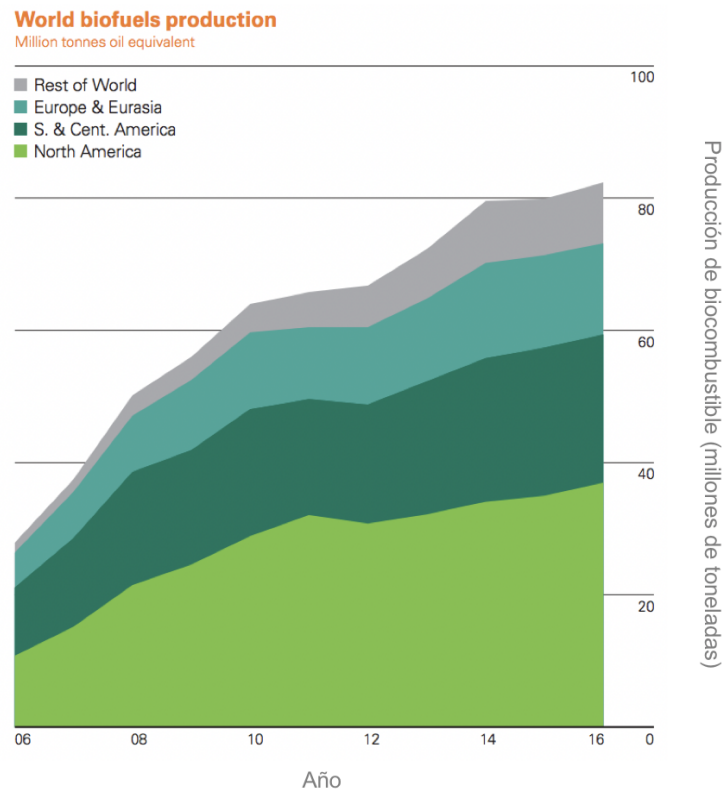


Fig. 2.1. Producción global de biocombustibles [6]

Se puede ver que Sudamérica y Centroamérica son las zonas con mayor producción tras Norteamérica, llegando a producir 22.378 millones de toneladas en el año 2016 (27,2 % del total). Sin embargo, este estudio se centrará únicamente en el biocombustible de segunda generación, concretamente en los productos maderables del material forestal, ya que es el más demandado en las regiones rurales de países en vías de desarrollo. El biocombustible sólido cuenta además con diversas ventajas, entre las que destacan su bajo contenido en azufre o nitrógeno, lo que disminuye de forma considerable las emisiones de  $NO_x$  y  $SO_2$ , así como su gran abundancia y la gran cantidad de puestos de trabajo que genera en las zonas rurales y más pobres [26]. El biocombustible sólido derivado de la biomasa forestal se puede procesar de varias formas, obteniendo diferentes productos: troncos de leña tradicionales, astillas, pellets, briquetas o carbón vegetal.

Las astillas de madera son residuos maderables procesados en trozos de entre 5 y 100 mm de longitud y que contienen entre un 20 % y un 55 % de humedad. Como se

puede apreciar en la TABLA 1, junto con la leña, es el elemento que contiene mayor proporción de cenizas. Además, es el elemento con menor densidad media por lo que, pese a su bajo costo, es uno de los combustibles menos eficientes. Tanto los pellets como las briquetas se obtienen mediante la compactación de los residuos maderables de varias formas en prensas a altas presiones. Esta transformación física permite obtener una mayor densidad energética, lo que los convierte en tipos de biomasa muy atractivos para su uso por su alta eficiencia. Suelen tener formas cilíndricas con un diámetro variado no mayor de 25 mm. Además de un alto poder calorífico (superior a 4.000 kcal/kg) tienen muy bajo contenido de humedad y se trata de un tipo de combustible con un porcentaje muy bajo de cenizas. El carbón vegetal es un combustible producto de la quema de leña en ausencia de oxígeno (pirólisis). Este producto cuenta con un elevado poder calorífico y es usualmente utilizado en la cocción de alimentos a fuego lento, ya que a pesar de no alcanzar altas potencias, mantiene una temperatura constante durante largos periodos de tiempo. Como se trata de un producto de un proceso previo de pirólisis, se trata de un combustible muy heterogéneo en cuanto a sus propiedades. Su humedad oscila entre el 8 y el 15 % y su contenido de ceniza es muy diverso según la muestra analizada. El carbón vegetal presenta además ventajas frente a la leña, tales como un mayor poder calorífico y menor proporción de humedad. Además, produce menor contaminación en sus emisiones a la atmósfera y presenta mayores facilidades de almacenamiento [11]. Es por tanto, al igual que la leña, un combustible relativamente barato y fácil de conseguir. Finalmente, la leña tradicional es el elemento más utilizado debido a su fácil acceso y bajo coste. Sin embargo, es un biocombustible menos eficiente debido a su menor poder calorífico, su alta concentración de humedad y su reducida densidad media.

TABLA 2.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE BIOMASA FORESTAL [11]

Tipo de biomasa	Tamaño de partícula típico	% en base húmeda			Densidad Media (Kg/m <sup>3</sup> )
		Humedad (%)	Cenizas (%)	PCI (Kcal/kg)	
Astilla de madera	5 a 100 mm	20-55	1 - 2	1.600-3.300	250
Pellets	Diámetro <25mm	<12	<1	>4.000	650
Briquetas	Diámetro <25mm	<10	<0,7	>4.400	580
Carbón vegetal	-	8 - 15	0,5 - 5	>4.400	-
Leña	-	20-30	1,2	3.000-3.400	380

## 2.2. Emisiones

Para comprender con mayor precisión el impacto de las emisiones de la biomasa, se hace necesario un análisis más profundo de la estructura química de ésta, con el objetivo

de comprender de dónde se obtiene la energía y cuáles son los productos residuales de este proceso. Como este estudio se centrará únicamente en la biomasa sólida y concretamente en los productos que se puedan obtener de la madera, se hace imprescindible un repaso de la composición química de ésta.

Los componentes fundamentales de los que está compuesta la madera son la celulosa y hemicelulosa, que representan entre el 60 % y el 82 % de la madera, y la lignina, que representa entre el 17 % y el 33 % de ésta (siempre dependiendo de la especie de madera) [27]. Estos componentes consisten en largas cadenas de polímeros orgánicos formados principalmente por carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O). Además, otros elementos tales como el calcio (Ca), potasio (K), fósforo (P) y magnesio (Mg) están también presentes en la madera aunque en menor proporción. Estos últimos elementos se obtienen tras la calcinación en residuos inorgánicos sólidos denominados cenizas. Las partículas de las cenizas pueden constituir aerosoles que se emiten a la atmósfera y pueden resultar perjudiciales para la salud.

El aprovechamiento energético de la biomasa se puede realizar de dos maneras: mediante conversión termoquímica o mediante conversión bioquímica. Ésta última se puede realizar mediante fermentación alcohólica o digestión anaeróbica, pero no será desarrollada en profundidad debido a que no constituye un elemento importante en el objeto de estudio. En la conversión termoquímica de la madera se pueden diferenciar cuatro fases diferentes. En la primera fase, denominada *secado*, la humedad remanente de la biomasa es evaporada. Este proceso tiene lugar a temperaturas cercanas a los 100 °C según la temperatura de ebullición local, ya que consiste en evaporar el agua contenida en el combustible. La segunda fase constituye la *pirólisis*, fase que se caracteriza por la ausencia de oxígeno y en la cual las cadenas de biopolímeros sufren una descomposición térmica a temperaturas superiores a los 300 °C, dando lugar por un lado a elementos volátiles y por otro a residuos sólidos (carbón). La composición de los gases volátiles obtenidos en la fase de pirólisis consta principalmente de  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$  y otros hidrocarburos ligeros en menor cantidad [27]. El carbón obtenido es producto de la formación de estructuras cristalinas de carbono y a través de una pirólisis a baja velocidad se puede obtener carbón vegetal con potencial térmico, el cual puede ser utilizado como combustible o fertilizante de suelos. Estas primeras fases de la conversión termoquímica como son el secado y la pirólisis son considerados procesos endotérmicos, lo que significa que se necesita un aporte energético externo para que sucedan. La velocidad de estos procesos viene determinada por el aporte calorífico y por la humedad del combustible, por tanto combustibles con tasas de humedad más bajas alcanzan con mayor rapidez la fase de pirólisis y optimizan el proceso. La siguiente fase, la *combustión*, es un proceso exotérmico debido a que tras la combustión de los gases volátiles con aire rico en oxígeno se obtiene energía térmica. La prueba visible de que la combustión se está produciendo es la llama, ya que ésta representa el aporte energético obtenido en la reacción entre volátiles y el oxígeno. El aporte de aire con el oxígeno necesario para la combustión se denomina aire secundario. Finalmente, la última fase en la conversión termoquímica de la madera es la *gasificación*, un

proceso en el que el carbón obtenido en la pirólisis es degradado a alta temperatura con exceso de oxígeno hasta obtener: gases combustibles (fundamentalmente  $CO$ ) que seguirán el proceso de combustión y residuos sólidos inorgánicos de desecho (cenizas). Esta última fase es igualmente un proceso exotérmico, pues se libera el potencial energético encerrado en el carbón vegetal. En la Fig. 2.2 se puede ver de forma clara el desarrollo de los procesos de combustión y gasificación.

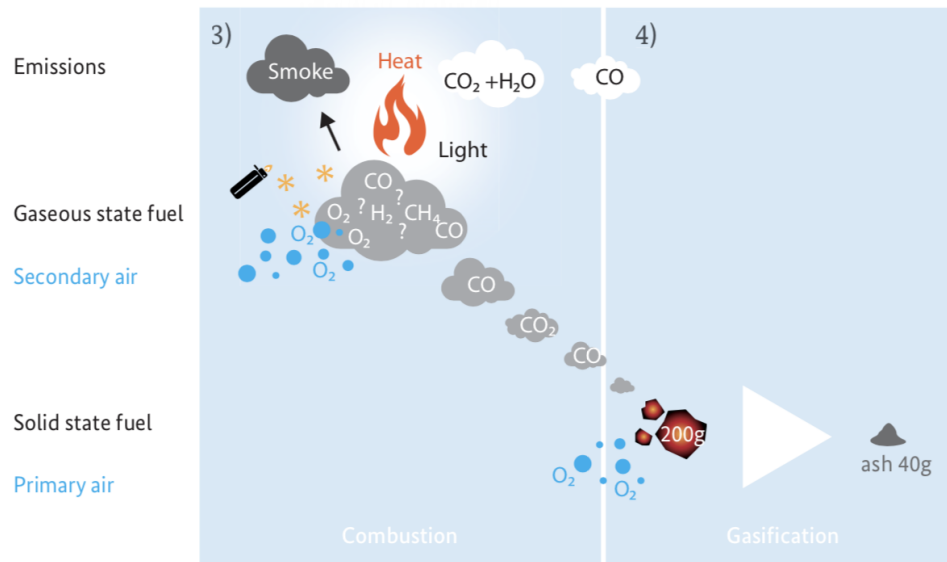
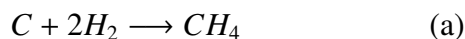
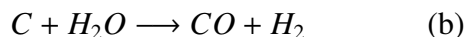
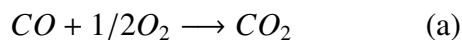


Fig. 2.2. Procesos de combustión y gasificación [7]

Si el proceso termoquímico de obtención de energía de la madera fuera ideal, los únicos productos que se obtendrían de éste serían  $CO_2$  y  $H_2O$ , sin embargo dado que ningún proceso es ideal, otros productos son obtenidos tras el proceso. Lo importante a destacar es que cuanto más óptima sea la conversión termoquímica de la madera, menos productos indeseados se obtendrán tras el proceso.

Las siguientes reacciones resumen de forma breve los procesos ocurridos y los productos obtenidos tras las fases de conversión termoquímica de la madera [28] :



(a) Reacción exotérmica

(b) Reacción endotérmica

De los productos obtenidos en las anteriores reacciones químicas, el  $CH_4$ ,  $CO_2$  y  $CO$  son los más destacables debido a su impacto negativo. El  $CO$  es altamente tóxico para el ser humano, por lo que una exposición prolongada a este gas podría llegar a ocasionar



la muerte. Cuenta además con un potencial global de calentamiento (GWP por sus siglas en inglés) de 1,9 veces el del dióxido de carbono. Por otra parte, el  $CH_4$  y el  $CO_2$  son dos agentes importantes de efecto invernadero, siendo los dos productos de la combustión de biomasa que mayor impacto causan en el medio ambiente. Se considera que el metano tiene alrededor de 21 veces mayor potencial de calentamiento que el dióxido de carbono[29], sin embargo éste último es el que mayor impacto tiene a nivel global debido a su elevada cantidad en la atmósfera. Además, aunque en menor medida, el óxido nitroso ( $N_2O$ ) y los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) también pueden ser agentes PICs (Products of Incomplete Combustion) y son también importantes agentes de efecto invernadero.

Estas emisiones son mayores cuando el proceso completo de combustión es menos eficiente. Además, una combustión deficiente aumenta la emisión de partículas al ambiente (carbón elemental, carbón negro,  $PM_{10}$  y  $PM_{2,5}$ ) siendo estas especialmente perjudiciales para la salud ya que debido a su pequeño tamaño pueden alcanzar los pulmones, ocasionando enfermedades respiratorias. Este material particulado suele estar formado en su mayoría por carbono, aunque se pueden encontrar otros elementos en menores proporciones (Fig. 2.3).

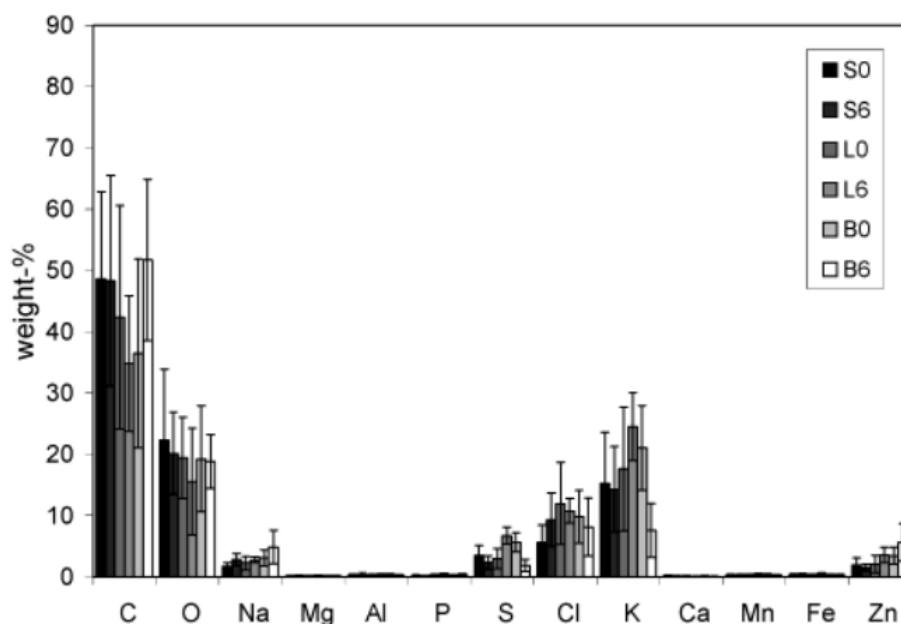


Fig. 2.3. Contenido del material particulado de distintos tipos de biomasa [8]

Por todas estas razones, un buen dispositivo de quema de biomasa fomentaría una combustión eficiente, lo que podría disminuir la emisión de gases y partículas de una forma destacable. A esto se suma el hecho de que al mejorar los dispositivos, se aumenta la eficiencia térmica y por tanto se utiliza menor cantidad de biocombustible para una misma tarea, lo que también puede alcanzar un ahorro significativo de emisiones.

### 2.3. Estufas mejoradas

Aunque la biomasa ha sido utilizada como combustible para cocinar desde siempre, los dispositivos para su utilización han ido progresando paulatinamente con el tiempo. De esta forma, el fogón de tres piedras (TSF por sus siglas en inglés: Three-Stone Fire) fue el dispositivo más empleado hasta el siglo XVIII y aún a día de hoy, sigue siendo el más empleado en las comunidades rurales de los países en vías de desarrollo [10]. En este dispositivo, las fases de la descomposición termoquímica previamente explicada tienen lugar simultáneamente, por lo que la combustión es menos eficiente y menos limpia. Además, como se puede apreciar en la Fig. 2.4, el fogón no tiene ningún conducto de escape para los gases, por lo que expone directamente a los usuarios a gases tóxicos.



Fig. 2.4. Fogón de tres piedras

En el año 2010, la entonces secretaria de estado de EEUU, Hilary Clinton, promovió la creación de la *Clean Cooking Alliance*, con el objetivo de integrar tecnologías de cocción más limpias en más de cien millones de hogares para el año 2020. Esto pasa por fomentar la demanda de estufas mejoradas a la par que se aporta un apoyo adicional para facilitar la transición al uso de combustibles más limpios. Para mejorar la eficiencia de combustión se impulsó el diseño de dispositivos que permitiesen una quema más limpia del biocombustible manteniendo a su vez un precio asequible y de uso fácil, a lo que se denominó *estufas mejoradas* (ICS, *Improved Cookstoves*). Existe una siguiente generación de estufas denominada ABS (Advanced Biomass Stoves), la cual cuenta con una tecnología más desarrollada que facilita ciertos avances como mayor eficiencia, menores emisiones, mayor seguridad para el usuario y durabilidad. De estas estufas avanzadas se pueden encontrar tanto estufas de tipo “rocket”, que ahorran hasta un 60 % de combustible y disminuyen las emisiones de CO en la misma medida, como gasificadores [10]. Aunque debido al alto grado de desarrollo de dicha tecnología, sus costos son elevados para la implantación en comunidades rurales e indígenas, por lo que las estufas mejoradas de primera generación son los dispositivos que mayor impacto tienen en este contexto.

En un interesante estudio realizado por MacCarty et al. [9] en el famoso *Aprovecho Research Center* en colaboración con la universidad de Illinois se llevó a cabo una comparativa entre cinco dispositivos de cocción de alimentos, dos tradicionales y tres estufas mejoradas. Como dispositivos tradicionales se utilizaron el popular fogón de tres piedras y un dispositivo simple de quema de carbón. Entre los dispositivos ICS se encontraba una estufa tipo *rocket*, un gasificador y un quemador de flujo forzado mediante un ventilador. Los resultados arrojados en dicho estudio pueden servir de guía para analizar las fuerzas y las debilidades de las estufas mejoradas. Como se aprecia en la Fig. 2.5, los dispositivos mejorados (ICS) muestran mejores resultados de cara al consumo de energía necesaria para evaporar 1 litro de agua. Se muestran por tanto más eficientes y se consigue un ahorro sustancial de combustible, así como un ahorro significativo de tiempo en comparación con el fogón de tres piedras.

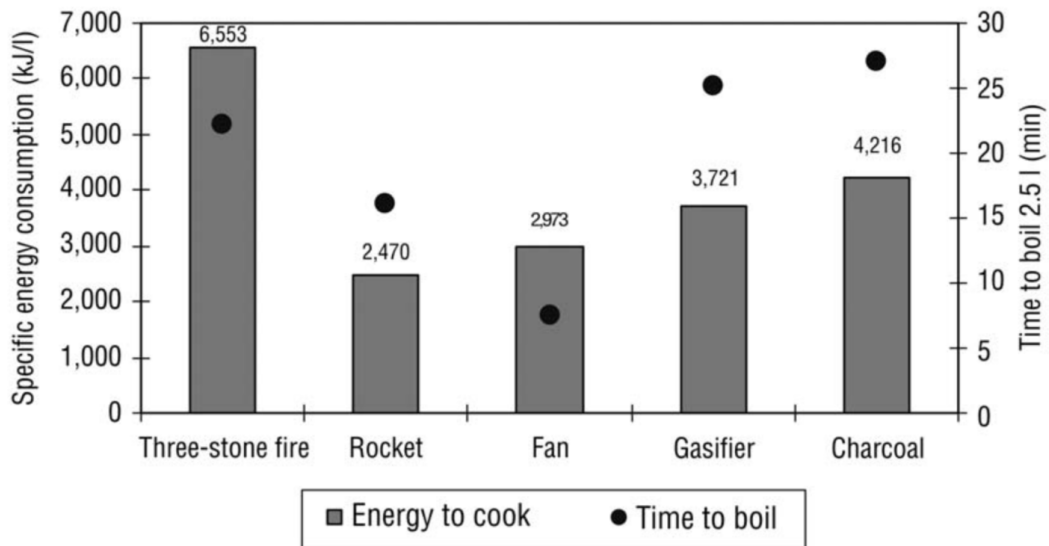


Fig. 2.5. Consumo específico de energía de los diferentes dispositivos [9]

En cuanto a las emisiones, la siguiente figura muestra que los dispositivos ICS mostraron un ahorro significativo de éstas, llegando incluso a una reducción del 50 % en comparación con el fogón de tres piedras. El dispositivo *rocket* y el quemador con ventilador prueban ser los dispositivos más eficientes en cuanto a la utilización de energía y también los menos contaminantes.

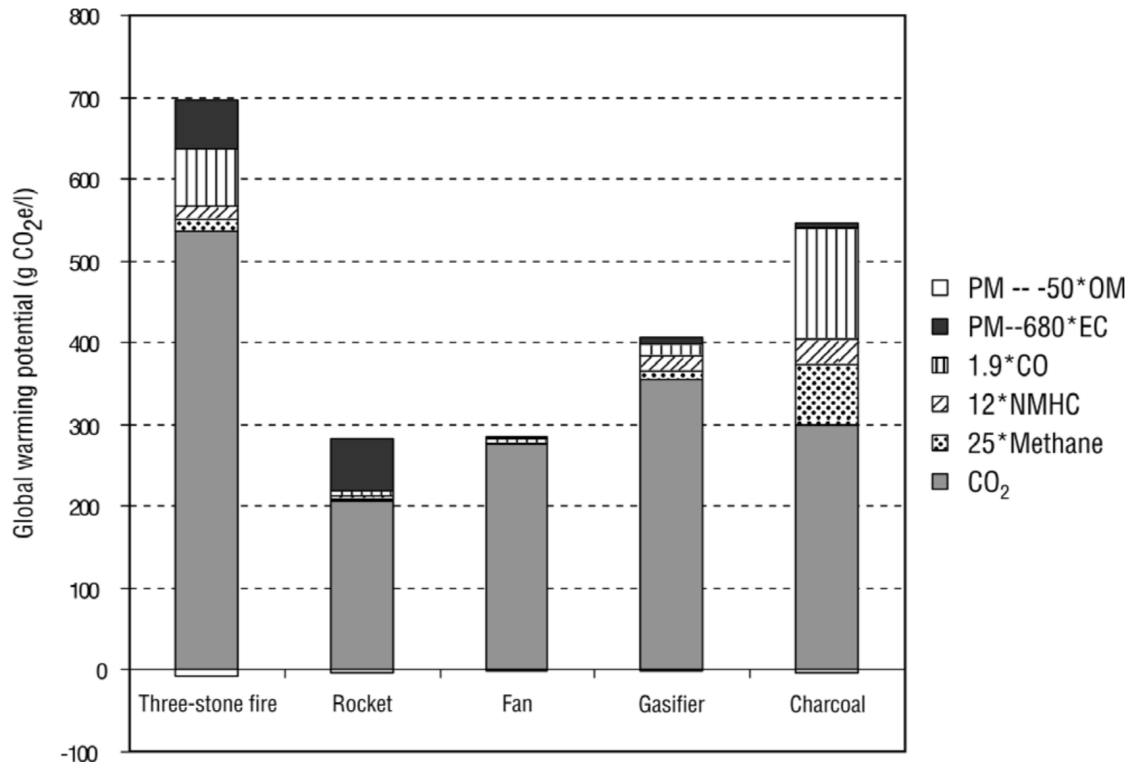


Fig. 2.6. Emisiones de agentes de efecto invernadero de los diferentes dispositivos [9]

Actualmente hay una amplia gama de estufas mejoradas diseñadas en diversas partes del mundo. La mayoría son de combustión directa, al contrario que los gasificadores. Algunas cuentan con una chimenea que permite un flujo de aire y expulsa la mayoría de los gases de la cocina, sin embargo normalmente las estufas con chimenea son menos eficientes y utilizan más combustible. Aún así, son muy utilizadas ya que se ha demostrado que extraen hasta el 99 % de las emisiones de la cocina [30]. Algunos ejemplos de estas estufas con chimenea son la “Uganda 2-pot” (Uganda), “Patsari” (Mexico), “Ecostove” (América Central); y “Onil” (Guatemala) [10].

Concretamente en México, tienen presencia varios modelos como por ejemplo la *Túumben K’óoben*, desarrollada en la Península de Yucatán, o la estufa *Onil* que aunque ha sido desarrollada en Guatemala, es ya fabricada y distribuida en algunas regiones de México. Sin embargo, a continuación se describirá con mayor detalle la *estufa Patsari*, ya que es la estufa objeto de esta investigación. Esta estufa ha sido diseñada en la zona central de México atendiendo a las necesidades y a la cultura local y es por tanto una de las que más aceptación ha tenido.

La estufa Patsari, cuyo significado es “la que guarda” en purépecha, es una estufa de leña desarrollada por el Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada (GIRA) en colaboración con el Centro de Investigaciones en Ecosistemas (CIEco) y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México [31]. La estufa está fabricada con ladrillos en su parte exterior, siendo la estructura interna de arcilla, arena y cemento. Consta de una estructura fija con tres comales, un comal principal y dos secundarios. La cámara de combustión se encuentra directamente debajo del comal principal y el biocombustible es introducido en ésta a través de la apertura frontal.



Fig. 2.7. Estufa Patsari

La combustión tiene lugar en la cámara de combustión y los gases calientes ascienden por la chimenea debido a la diferencia de presiones producida por el largo de ésta. Este tiro creado por la chimenea hace que los gases calientes pasen por los dos comales secundarios, cediendo el calor remanente y por tanto aprovechando al máximo la energía desprendida por el combustible. La chimenea, además de cumplir con la labor de ventilador, extrae los gases de la cocina, reduciendo por tanto las emisiones intramuros que pueden afectar a la salud del usuario. Kshirsagar y Kalamkar llevaron a cabo una comparativa de las diferentes estufas existentes, siendo destacable la Fig. 2.8 en donde se puede apreciar la capacidad de potencia de la estufa Patsari en comparación con otras estufas. Como se puede ver, tiene uno de los mayores índices de potencias entre las diferentes estufas, teniendo además una relación de trabajo aceptable.

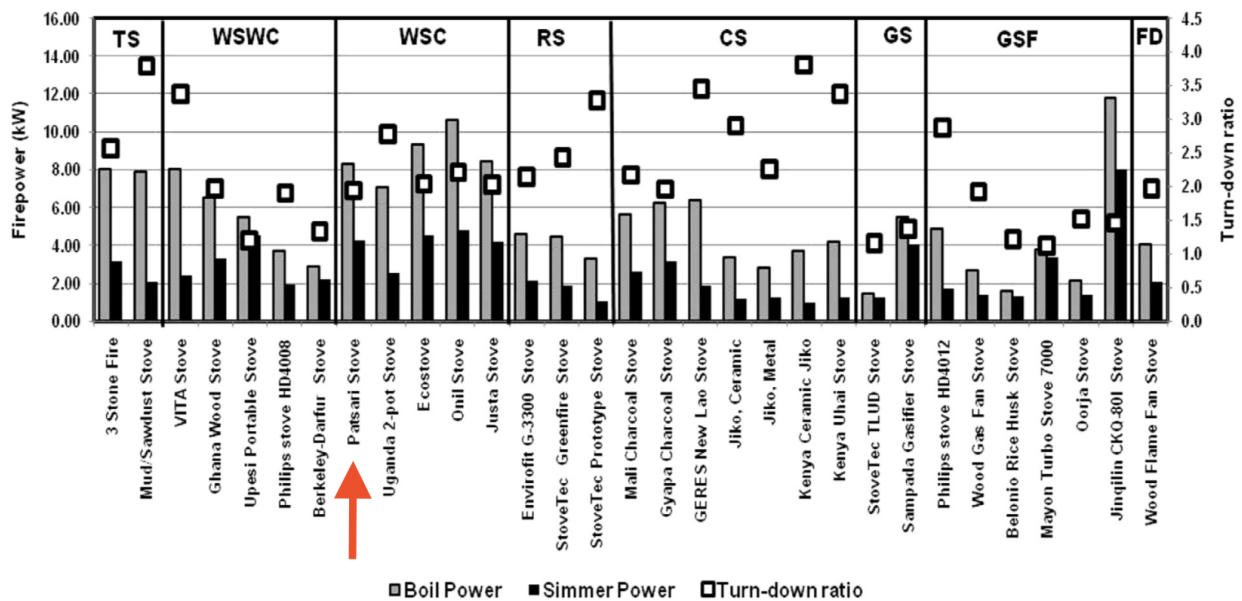


Fig. 2.8. Potencia y relación de trabajo de las diferentes estufas [10]

Este dispositivo se ha mostrado eficiente como alternativa al fogón tradicional en la zona central de la República de México, tanto en el plano de la seguridad del usuario, donde se ha documentado una disminución de las partículas  $PM_{2.5}$  cerca de la estufa de hasta un 71 % [32], como en el plano medioambiental, ya que las emisiones de gases de efecto invernadero se han visto reducidas en un 74 % [33]. En el plano económico, un estudio realizado por Garcia-Frapolli et al. [34] en el que se tuvo en cuenta el ahorro en combustible, en tiempo y los beneficios a la salud, estimó que los beneficios obtenidos en un hogar tras reemplazar el fogón por la estufa Patsari rondaba los 732 \$ al año. El 53 % de estos ahorros se relacionaron directamente con el ahorro en combustible debido a la mejor eficiencia del dispositivo, siendo además el 28 % ahorro debido a los beneficios en la salud al estar menos expuesto a gases tóxicos.

La estufa Patsari es el resultado de un proceso colaborativo entre las diferentes organizaciones de investigación y desarrollo y las comunidades rurales del estado de Michoacán. Se trata de una forma de implementación de ecotecnologías en la que se tienen en cuenta las necesidades y las tradiciones de los usuarios, de cara a mejorar la adopción de la tecnología. Para ello se han llevado a cabo distintas fases tanto para integrar las necesidades y desarrollar la tecnología como para posteriormente difundir y monitorear el resultado, de cara a cuantificar la aceptación de la tecnología.

## 2.4. Micro gasificadores

El principio básico de un gasificador consta de separar la fase de pirolisis de la fase de combustión, mientras que en los fogones tradicionales y en la mayoría de las estufas, estas dos fases ocurren casi simultáneamente. En la fase de pirolisis, los volátiles son obtenidos de la biomasa sólida utilizando para ello una cantidad pequeña de aire (aire primario) con escasez de oxígeno. De esta fase se obtiene como resultado sólido carbón vegetal, que puede ser quemado para extraer más energía o puede ser utilizado como fertilizante de suelos. En la fase de combustión, los gases volátiles extraídos de la biomasa son quemados con un aporte de aire rico en oxígeno (aire secundario). Para comenzar la pirolisis es necesario un aporte inicial de energía, por lo que se tiene que prender la biomasa para que comience el proceso. Este encendido tiene lugar en la mayoría de los gasificadores en la parte superior del combustible (Top Lit). También los flujos de aire son variables, pueden ser ascendentes o descendentes. La mayoría de los gasificadores empleados en la cocción de alimentos utilizan el flujo de aire ascendente (Up Draft) por lo que los gasificadores TLUD (Top Lit Up Draft) son los más comunes [7]. En este tipo de dispositivos, el flujo de aire es ascendente, pero el frente pirolítico migratorio (MPF), que describe el avance de la pirolisis en el combustible, tiene un sentido descendente.

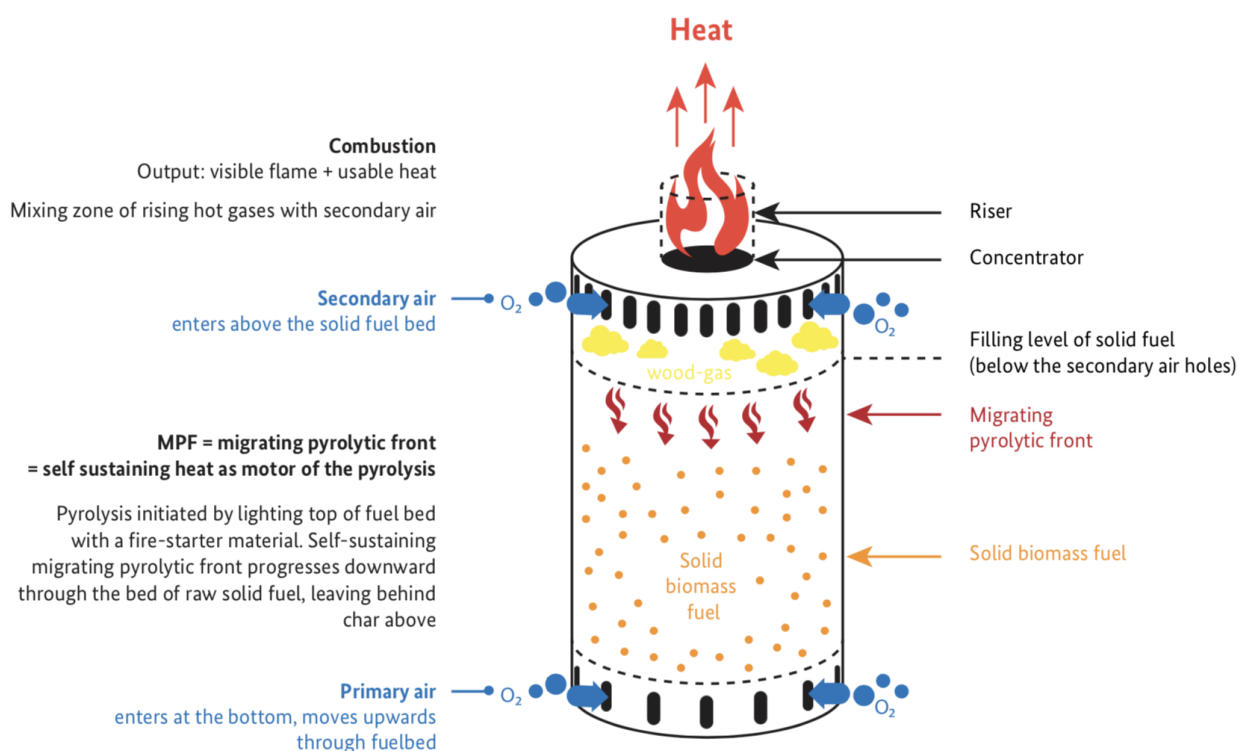


Fig. 2.9. Esquema del funcionamiento de un micro gasificador [7]

Existen dos tipos de gasificadores en función de cómo se generan los flujos de aire: los gasificadores de tiro natural y los gasificadores de tiro forzado. Los primeros generan el flujo gracias a la diferencia de densidades del aire caliente y el aire frío y los segundos lo

generan gracias a la diferencia de presiones creada por un ventilador. Aunque los gasificadores de tiro natural son los más utilizados, estos suelen ser menos eficientes ya que están sujetos a cualquier mínimo cambio en el ambiente, lo que acaba afectando a la temperatura máxima de llama y por tanto produciendo una peor combustión [35]. Sin embargo, los gasificadores de tiro forzado presentan diversos problemas a la hora de su aplicación, ya que son más costosos y suelen requerir energía eléctrica para accionar el ventilador. Otras variables importantes a tener en cuenta para ajustar la potencia y la eficiencia de un gasificador son: la altura y el diámetro de la cámara de combustión y la relación entre el aire primario y el aire secundario.

En cuanto al biocombustible sólido a utilizar, éste puede ser de diferentes tipos. Sin embargo, como indica el informe de GIZ [7], hay una serie de características que debería tener el biocombustible de cara a un aprovechamiento óptimo del dispositivo. Debe tener una baja proporción de humedad para evitar pérdidas energéticas empleadas en evaporar el agua del biocombustible. Es también aconsejable que éste sea uniforme para prevenir un avance desigual del frente pirolítico. El tamaño y la forma de las partículas debería ser uniforme, siendo a su vez recomendable que éstas sean mayores de 4 mm para facilitar un flujo de aire fluido. Por último, la relación de densidad energética debería ser lo más óptima posible para conseguir una buena eficiencia de quemado en el dispositivo. Para conseguir esta densidad aparente es recomendable procesar la biomasa para producir pellets o briquetas. No obstante, hay que tener en cuenta otros parámetros de cara a la elección del combustible tales como la accesibilidad a éste del usuario, la repercusión económica o el impacto medioambiental.

## **2.5. Antecedentes**

Como antecedentes al proyecto pretendido, únicamente se ha podido encontrar el análisis desarrollado por F. Enrique y T. Suárez [36] en el que se comparaba la eficiencia energética y las emisiones de una estufa mejorada utilizando dos modelos con diferentes cámaras de combustión: un codo rocket y un micro-gasificador TLUD. En este proyecto se utilizó leña como combustible para el codo rocket y pellets, olote y chips de madera para el micro-gasificador. Los resultados arrojaron que el TLUD consiguió llegar al punto de ebullición del agua más rápido que el modelo con el codo rocket, además de disminuir las emisiones de  $CO$  y  $CO_2$ .



### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Dispositivo

El dispositivo que se adaptará a la estufa Patsari es un micro gasificador de tiro natural como el que se muestra en la Fig. 3.1. El gasificador mide  $22,5\text{ cm}$  de altura y su cámara de combustión encierra un volumen de  $3.321,8\text{ cm}^3$ . Su abertura superior muestra un área de  $66,5\text{ cm}^2$  que comprende el área efectiva de contacto entre la llama producto de la combustión y la olla.



Fig. 3.1. Micro gasificador

Como se puede ver, el dispositivo está diseñado para que pueda ser utilizado de forma individual, ya que cuenta con cuatro patas sobre las que puede ser apoyado en el suelo. Cada pata mide  $52\text{ mm}$ , y a pesar de no tener un grosor considerable, cuentan con una curvatura que dota al dispositivo de gran estabilidad al estar apoyado en el suelo. El micro gasificador cuenta además con un disco superior de  $183\text{ mm}$  de diámetro sobre el que puede ser colocado un caldero o una olla. Ese disco superior cuenta con un agujero concéntrico de  $110\text{ mm}$  de diámetro a través del cuál deben pasar las llamas para hacer contacto directo con la superficie de la olla, de forma que maximice la transferencia de calor.

El resto de los parámetros se pueden observar en la Fig. 3.2. El dispositivo ha sido también diseñado con el objetivo de que el disco superior se pueda acoplar al comal de la estufa, dejando el resto de la estructura colgando en la cámara de combustión de ésta.

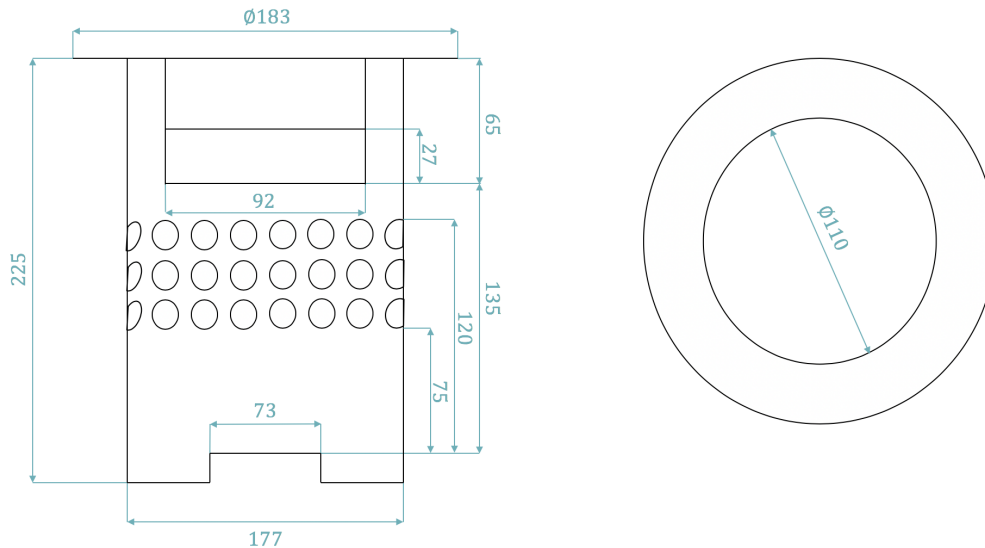


Fig. 3.2. Medidas del micro gasificador

La entrada de aire primario se produce por la base del dispositivo, donde se encuentran 154 agujeros de diámetro 0,5 cm. La entrada de aire secundario se encuentra en la parte superior de la cámara de combustión del gasificador, y está compuesta por 81 agujeros de diámetro 1,3 cm. Se puede comprobar que la diferencia en el diámetro de los agujeros de la entrada primaria y la entrada secundaria se debe al objetivo que debe cumplir cada una. En la entrada primaria se espera que haya un defecto de oxígeno de cara a favorecer la pirólisis, de ahí que los agujeros tengan un diámetro menor. Sin embargo, en la entrada secundaria se pretende realizar la combustión con exceso de oxígeno, por lo que es importante que tengan un diámetro adecuado que favorezca el flujo de aire.

### 3.2. Adaptación

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo es adaptar el micro gasificador a uno de los comales secundarios de la estufa Patsari, de forma que este comal pueda funcionar de manera independiente de la estufa, favoreciendo así la versatilidad de ésta. Esto ayudaría en las tareas de cocción de forma que se puedan realizar diferentes tareas a la vez. En la estufa Patsari original, el comal principal es el que cuenta por defecto con una cámara de combustión. Los comales secundarios se utilizan con el calor remanente de los gases que pasan por debajo de éstos en su camino hacia la chimenea. Por ello, se plantea una remodelación de la estufa en el comal secundario derecho, proporcionando una cavidad extra donde se pueda insertar el dispositivo. La cavidad resultante mide 27,5 cm de alto, de forma que el micro gasificador queda colgando del comal y sobra espacio por

debajo de éste para que el flujo de aire pueda penetrar por los agujeros primarios. Se ha colocado en la cavidad una estructura cilíndrica de aluminio con las mismas medidas, de forma que evite desprendimientos de las paredes internas de la estufa. Se hace necesario la realización de una abertura lateral de forma que tanto el aire primario como el secundario puedan llegar sin problema. A esta abertura se le ha añadido también un marco de aluminio para evitar desprendimientos. Finalmente, se ha conectado una salida de la cavidad con la entrada de la chimenea, con el objetivo de que los gases de escape sean succionados por la chimenea y se favorezca por tanto el tiro natural del micro gasificador. Para ello, se utilizó una estructura de 5x8 cm que se insertó en la estructura cilíndrica de la cavidad.



Fig. 3.3. Labores de remodelación en la estufa



Fig. 3.4. Abertura lateral

### 3.3. Test WBT

En la mayoría de las pruebas de evaluación de estufas de leña se viene utilizando el protocolo WBT 4.2.3, como indica Medina et al. en este estudio [37]. El WBT (Water Boiling Test) consta de tres fases: una primera fase, llamada *inicio frío*, en la que una cantidad de agua dada es calentada desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de ebullición local. Una segunda fase, *inicio caliente*, en la que se trata de calentar la misma cantidad de agua renovada, partiendo con la estufa aún caliente de la fase anterior y llegando de nuevo al punto de ebullición local. Finalmente, la última fase, denominada *simmering*, consta de mantener la cantidad de agua resultante de la anterior fase a una temperatura inferior a la de ebullición, manteniendo una baja potencia para ello [38]. Para evaluar la eficiencia térmica del micro gasificador en este proyecto se utilizará una versión modificada del WBT en la que se incluirán únicamente dos fases: una primera fase de alta potencia cuya duración será lo que tarde el combustible en calentar 1 litro de agua hasta el punto de ebullición (en caso de que no llegue a ebulir se contabilizará la temperatura máxima que alcance) y una segunda fase en la que se mantendrá el agua a alta temperatura hasta que ésta se encuentre 5 grados por debajo del punto de máxima temperatura. Se partirá para ello de una temperatura del agua que oscile los  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Este tipo de prueba es la mejor herramienta para medir la eficiencia térmica, la potencia de llama y el consumo específico del dispositivo. Dado que la medición de las emisiones no constituye un objetivo en este estudio, el WBT bastará para obtener los parámetros de interés.

Para calcular la temperatura de ebullición local que debe alcanzar el agua se ha tenido en cuenta la presión local del lugar donde se desarrollan las pruebas. El laboratorio se encuentra en la ciudad de Morelia, en el estado mexicano de Michoacán, a unos 1965 metros con respecto al nivel del mar. La presión atmosférica viene dada por la siguiente ecuación:

$$P(h) = P' \cdot e^{\alpha \cdot h} = 0,79\text{ atm} \quad (3.1)$$

Donde  $P'$  es la presión atmosférica al nivel del mar (1 atm),  $h$  es la altura y  $\alpha$  viene dado por:

$$\alpha = (\rho \cdot g)/P' = 1,18 \cdot 10^{-4}\text{ m}^{-1} \quad (3.2)$$

Siendo  $\rho$  la densidad media del aire ( $1,22\text{ kg/m}^3$ ) y  $g$  la aceleración de la gravedad ( $9,81\text{ m/s}^2$ ). Teniendo esto en cuenta, la temperatura de ebullición del agua utilizada por convenio en la ciudad de Morelia es de  $92\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 3.4. Combustible

La lista final de combustibles con los que se llevaron a cabo las pruebas de eficiencia térmica del micro gasificador es la siguiente:

- *Astillas (encino blanco)*
- *Tecata (corteza de encino blanco)*
- *Pellet n°1(Quercus sin corteza)*
- *Pellet n°2 (Táscate con corteza)*

Tras descartar el carbón vegetal en las pruebas piloto, se decidió introducir la tecata de encino blanco. Las propiedades de los pellets se tomaron directamente de un estudio de Miguel Quiñonez con el que se colaboró de forma activa en el LINEB (Laboratorio de Innovación y Evaluación de Estufas de Biomasa). Así pues, la determinación experimental tanto de la humedad como del poder calorífico fue únicamente necesaria para las astillas y la tecata.

Para determinar la humedad de las astillas y la tecata se llevaron a cabo tres pruebas para cada combustible, utilizando un horno de secado para extraer la humedad. En las pruebas se colocaron 100 g de combustible en una bandeja de forma uniforme, para conseguir un reparto más homogéneo del calor por toda la superficie y lograr así un secado óptimo. Tras una prueba inicial, se determinó que el tiempo mínimo de secado sería de dos horas, ya que tras el transcurso de este tiempo los valores de la masa del combustible se mantenían estables. Así pues, se llevaron a cabo seis pruebas de secado con una duración fija de 120 minutos cada una. El horno de secado se mantuvo a 95 °C para asegurar una temperatura superior a la temperatura local de ebullición. Tanto en estas pruebas como en las que seguirán, se ha calculado un valor medio de cara a una mayor facilidad comparativa entre materiales.



Fig. 3.5. Horno de secado

La humedad se determinó analizando la diferencia en la masa inicial y la masa tras el secado completo. Se utilizó la siguiente expresión para determinar el porcentaje de humedad en base seca para cada prueba:

$$H(\%) = \frac{M_{inicial} - M_{seco}}{M_{seco}} \cdot 100 \quad (3.3)$$

Donde  $M_{inicial}$  es la masa del combustible previo al secado y  $M_{seco}$  es la masa del combustible tras un secado de dos horas a 95 °C. A continuación, en la TABLA 3.1 y en la TABLA 3.2 se pueden observar los datos obtenidos en el proceso de secado de las diferentes pruebas:

TABLA 3.1. HUMEDAD DE LAS ASTILLAS

Nº Prueba	% en base seca		
	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Humedad (%)
1	100,00	86,00	16,28
2	100,00	86,00	16,28
3	100,00	86,00	16,28
MEDIA	100,00	86,00	16,28

TABLA 3.2. HUMEDAD DE LA TECATA

% en base seca			
Nº Prueba	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Humedad ( %)
1	100,00	84,00	19,05
2	100,00	84,00	19,05
3	100,00	82,00	21,95
MEDIA	100,00	83,3	20,02

Como se puede ver, las astillas tienen menor cantidad de humedad (16,28 %) que la tecata (20,02 %), sin embargo, ambos combustibles presentan una humedad por encima del 12-14 % recomendado para las pruebas de eficiencia térmica. Por este motivo, se hace necesario un secado previo de estos combustibles de cara a un mayor aprovechamiento.

Para llevar a cabo los cálculos posteriores sobre eficiencia térmica es necesario, sin embargo, utilizar la humedad en base húmeda. Se hace necesario por tanto la obtención de la humedad en base húmeda mediante la siguiente expresión:

$$H_{bh}(\%) = \frac{H_{bs}/100}{1 + (H_{bs}/100)} \cdot 100 \quad (3.4)$$

El otro parámetro a obtener, el poder calorífico inferior, se consiguió utilizando un calorímetro (Fig. 3.6). Para ello es necesario peletizar 1 gramo del combustible que se desea estudiar e introducirlo en un volumen de agua. De forma automática se introduce la cantidad adecuada de oxígeno para llevar a cabo una combustión controlada. Posteriormente, mediante unos termopares internos, se determina la variación de temperatura del agua y se obtiene el calor suministrado por el combustible.

$$Q = m_c \cdot PCI \quad (3.5)$$

De la ecuación 3.5 se puede obtener finalmente el poder calorífico, donde Q hace referencia al calor suministrado por el combustible y  $m_c$  es la masa total del combustible.



Fig. 3.6. Calorímetro

Para este procedimiento se llevaron a cabo también tres pruebas por cada material, en las cuales el peso se debe medir meticulosamente utilizando una balanza electrónica (Fig. 3.7) para obtener gran precisión y evitar así variaciones.



Fig. 3.7. Balanza electrónica



Los datos obtenidos en el calorímetro se muestran a continuación en las siguientes tablas:

TABLA 3.3. PODER CALORÍFICO DE LAS ASTILLAS

<b>Nº Prueba</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Poder Calorífico (MJ/kg)</b>
1	1,00117	18,4301
2	1,00065	18,2635
3	1,01785	18,4679
MEDIA	1,0066	18,3872

TABLA 3.4. PODER CALORÍFICO DE LA TECATA

<b>Nº Prueba</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Poder Calorífico (MJ/kg)</b>
1	1,0033	16,5129
2	1,01081	16,5322
3	1,02213	16,6808
MEDIA	1,0121	16,5753

Podemos ver en la TABLA 3.3 y en la TABLA 3.4 que el poder calorífico de las astillas y la tectata son similares, siendo el de las astillas algo superior. Como se ha indicado anteriormente, la obtención experimental de estos parámetros para los dos tipos de pellets no ha sido necesaria ya que ese combustible ha sido parametrizado en otro estudio en colaboración con el LINEB. A continuación, se muestra una comparativa final entre los cuatro combustibles y sus parámetros, representando los valores medios obtenidos en las pruebas.

TABLA 3.5. CARACTERÍSTICAS DE LOS COMBUSTIBLES

<b>% en base húmeda</b>		
<b>Combustible</b>	<b>Humedad ( %)</b>	<b>Poder Calorífico (MJ/kg)</b>
Astillas	14	18,4
Tecata	17	16,3
Pellet nº1	9	20,1
Pellet nº2	9	21,8

Se puede comprobar que los dos tipos de pellets presentan menor humedad y mayor poder calorífico que los otros combustibles, lo que hará que seguramente sean los combustibles que mejor rendimiento den al micro gasificador.

### 3.5. Prámetros de estudio

En este apartado se analizarán los parámetros de importancia de cara a analizar el rendimiento del dispositivo: el consumo específico, la tasa de quemado, la potencia y la eficiencia térmica. Estos parámetros se estudiarán primero en función de cada combustible, analizando las diferencias entre pruebas, para luego hacer una comparativa final entre los diferentes combustibles y hacer un balance del rendimiento del gasificador.

El consumo específico (SC por sus siglas en inglés), constituye la relación entre la masa del combustible utilizado y la cantidad de agua evaporada:

$$SC = \frac{m_c + m_i}{m_{we}} \quad (3.6)$$

Donde  $m_c$  hace referencia a la masa del combustible utilizado,  $m_i$  es la masa del iniciador y  $m_{we}$  es la cantidad total de agua evaporada tras la prueba.

La tasa de quemado, BR por sus siglas en inglés (*Burning rate*), se obtiene de la relación entre el combustible consumido y el tiempo de la prueba, como se puede ver en la siguiente expresión:

$$BR = \frac{m_c}{t_{total}} \quad (3.7)$$

Donde  $m_c$  hace referencia al combustible total consumido y  $t_{total}$  es la duración de la prueba.

Para calcular la potencia se utilizará la siguiente ecuación:

$$P(kW) = \frac{m_c \cdot PCI_c + m_i \cdot PCI_i}{t_{total}} \quad (3.8)$$

Donde  $m_c$  es la cantidad del combustible de estudio consumido,  $m_i$  es la cantidad de iniciador (que serán siempre astillas),  $PCI_c$  es el poder calorífico inferior del combustible que se estudia y  $PCI_i$  es el poder calorífico inferior del iniciador utilizado.

Finalmente, para calcular la eficiencia térmica ( $\eta$ ) del dispositivo con astillas y teca se utilizará la siguiente expresión en la que no se tiene en cuenta la humedad del combustible debido al proceso previo de secado [39]:

$$\eta(\%) = \frac{C_{p,H_2O} \cdot m_{H_2O} \cdot \Delta T_{H_2O} + h_{v,H_2O} \cdot m_{H_2Oevap}}{m_c \cdot PCI_c + m_i \cdot PCI_i} \quad (3.9)$$

Donde  $C_{p,H_2O}$  es el calor específico del agua ( $4,18 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ ),  $m_{H_2O}$  la cantidad de agua total,  $\Delta T_{H_2O}$  representa el aumento de la temperatura del agua hasta la temperatura máxima,  $h_{v,H_2O}$  es la entalpía de vaporización del agua ( $2260 \text{ J/g}$ ),  $m_{H_2Oevap}$  representa la cantidad de agua evaporada,  $m_c$  es la cantidad de combustible consumido,  $PCI_c$  es el po-

der calorífico inferior del combustible,  $m_i$  es la cantidad de iniciador y  $PCI_i$  es el poder calorífico inferior del iniciador (astillas).

La expresión utilizada para calcular la eficiencia térmica de los pellets será la misma pero añadiendo el término de la humedad del combustible (H):

$$\eta(\%) = \frac{C_{p,H_2O} \cdot m_{H_2O} \cdot \Delta T_{H_2O} + h_{v,H_2O} \cdot m_{H_2O_{evap}}}{m_c \cdot (1 - H) \cdot PCI_c + m_i \cdot PCI_i} \quad (3.10)$$

## 4. PRUEBAS EXPERIMENTALES

Inicialmente se llevaron a cabo una serie de pruebas piloto para determinar la viabilidad de los combustibles y del dispositivo con unos estándares detallados más adelante. Una vez finalizadas las pruebas piloto, para llevar a cabo las pruebas experimentales, se realizaron tres pruebas con cada combustible como manda la norma. Para cada resultado se estableció un valor medio de cara a un análisis más simplificado a la hora de realizar la comparativa. En todas las pruebas se han utilizado 450 g del combustible a analizar y 50 g de iniciador. Se ha utilizado como iniciador una muestra de astillas mojadas en alcohol y se ha reproducido el mismo iniciador en todas las pruebas de cara a homogeneizar el resultado. Para realizar el test WBT modificado, se ha utilizado un olla de 470 g con un litro de agua. Un termopar ha medido la temperatura del agua cada 2 minutos, marcando la temperatura máxima alcanzada y la temperatura final (5 grados por debajo de la máxima temperatura). En la figura 4.1 se puede observar el proceso de las pruebas experimentales.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.1. Pruebas experimentales

## 4.1. Pruebas piloto

### 4.1.1. Primera fase

En la primera fase de las pruebas piloto se ha pretendido analizar el potencial de dos posibles combustibles de cara a las pruebas del micro gasificador. Para ello, los combustibles seleccionados fueron astillas de encino blanco y carbón vegetal. Esta primera fase de pruebas piloto se ha llevado a cabo adaptando el micro gasificador al comal principal de la estufa Patsari. Las primeras pruebas efectuadas fueron fallidas, debido principalmente a que la abertura principal de la cámara de combustión de la estufa Patsari es demasiado baja, lo que impide la entrada de flujo de aire a la parte superior del micro gasificador. Esta carencia de aire secundario provoca que la llama se ahogue si el dispositivo se ha llenado hasta arriba de combustible. Es por este motivo que fue necesario disminuir la cantidad de combustible hasta la mitad (por debajo de los agujeros de entrada de aire secundario) para mejorar la combustión inicial. Se utilizaron por lo tanto 350 gramos de combustible en cada prueba, siendo 50 de esos gramos el iniciador. Una vez solventado este problema, se procedió a probar ambos combustibles, obteniendo los resultados mostrados en la siguiente tabla.

TABLA 4.1. PRIMERA FASE DE PRUEBAS PILOTO

<b>Combustible</b>	<b>T<sup>a</sup> ambiente (°C)</b>	<b>T<sup>a</sup> inicial del agua (°C)</b>	<b>Tiempo total (min)</b>	<b>Fase de alta potencia (min)</b>	<b>T<sup>a</sup> máxima (°C)</b>
Astillas	19.0	27.0	23	21	91.9
Carbón vegetal	20.0	25.0	82	72	66.7

Como se puede apreciar en la TABLA 4.1, las astillas de madera cumplieron con el objetivo que se pretende analizar en las pruebas WBT, llegando al punto de ebullición de 1 litro de agua. Sin embargo, la temperatura máxima alcanzada por el carbón vegetal fue tan solo de 66,7 °C, necesitando para ello 72 minutos. El carbón vegetal es, como se puede ver, un combustible óptimo para la cocción de alimentos a baja potencia y de forma prolongada, pero no cumple con las expectativas para las pruebas WBT.



Fig. 4.2. Prueba piloto en el comal principal

De esta primera fase de pruebas piloto se extrajeron por tanto dos variables importantes de cara a optimizar las pruebas del dispositivo. Por un lado, la necesidad de hacer una abertura más alta en el comal secundario para que la entrada de aire secundario pudiera alimentar el combustible sin problema y de esta forma poder introducir mayor cantidad de combustible en el gasificador. Por otro lado, la necesidad de sustituir el carbón vegetal por otro combustible que sí cumpla los requerimientos para llevar a cabo las pruebas WBT. Se añadirá por tanto la tecata a la lista de combustibles con los que probar la eficiencia del dispositivo.

#### 4.1.2. Segunda fase

Esta segunda fase de pruebas piloto sirve para analizar el correcto funcionamiento del micro gasificador ya adaptado a uno de los comales secundarios. Para estas pruebas se utilizaron dos combustibles, astillas y tecata, llenando prácticamente el dispositivo (500 g de combustible, de los que 50 g son iniciador). Los resultados obtenidos se pueden ver en la TABLA 4.2.

TABLA 4.2. SEGUNDA FASE DE PRUEBAS PILOTO

Combustible	T <sup>a</sup> ambiente (°C)	T <sup>a</sup> inicial del agua (°C)	Tiempo total (min)	Fase de alta potencia (min)	T <sup>a</sup> máxima (°C)
Astillas	18.4	26.3	33	28	91.3
Tecata	19.2	27.0	27	19	92

Como se puede apreciar, ambos combustibles cumplieron el objetivo de llegar al punto de ebullición de 1 litro de agua en un tiempo razonable. Esta segunda fase de pruebas piloto arrojaron por tanto un análisis positivo del funcionamiento del dispositivo, dando luz verde a comenzar las pruebas experimentales.



Fig. 4.3. Prueba piloto en el comal secundario

## 4.2. Astillas

En la TABLA 4.3 se pueden observar los datos iniciales de las pruebas con las astillas así como los parámetros característicos de las mismas.

TABLA 4.3. PRUEBAS CON ASTILLAS

Nº Prueba	T <sup>a</sup> ambiente (°C)	T <sup>a</sup> inicial del agua (°C)	Tiempo total (min)	T <sup>a</sup> máxima (°C)
1	14,2	24,5	26	87,1
2	16,4	23,8	27	84,2
3	14,5	24,6	24	84,4
MEDIA	15,0	24,3	25,7	85,2

Las pruebas se realizaron a una temperatura ambiente media de 15 °C y con una temperatura media del agua de 24,3 °C dentro de la norma. Los tiempos de las pruebas se desarrollaron de forma homogénea, con una duración media de 25,7 minutos de los cuales 22,7 representan la fase de alta potencia hasta alcanzar la máxima temperatura, como se puede ver en la Fig. 4.4. La fase de alta potencia representó por tanto un 88,3 % del total de la prueba, siendo el 11,7 % de la prueba la fase de baja potencia hasta consumir casi por completo el combustible.

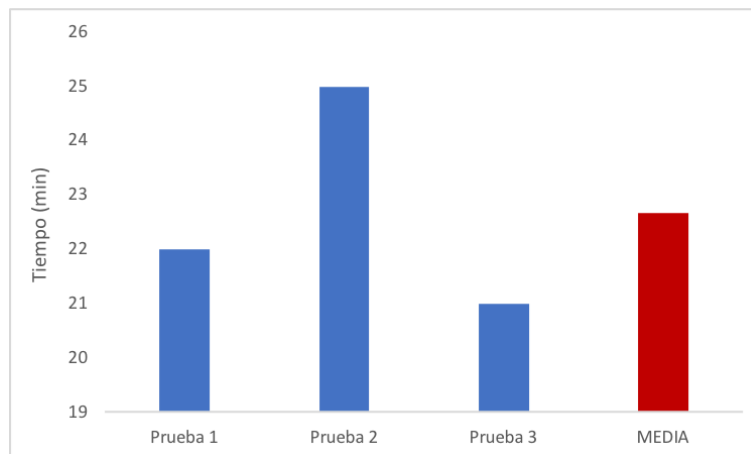


Fig. 4.4. Duración de la fase de alta potencia en las pruebas con astillas

En la Fig. 4.5 se muestra el perfil de temperaturas de las tres pruebas con astillas, donde se puede observar la temperatura máxima alcanzada en cada prueba y la temperatura final de éstas. Como se puede comprobar, las tres pruebas muestran perfiles similares, siendo la temperatura máxima media de 85,2 °C. Aunque ninguna de las pruebas alcanzó la temperatura de ebullición local, todas se aproximaron, superando los 80 °C, por lo que se han contabilizado como pruebas válidas de cara al análisis final.

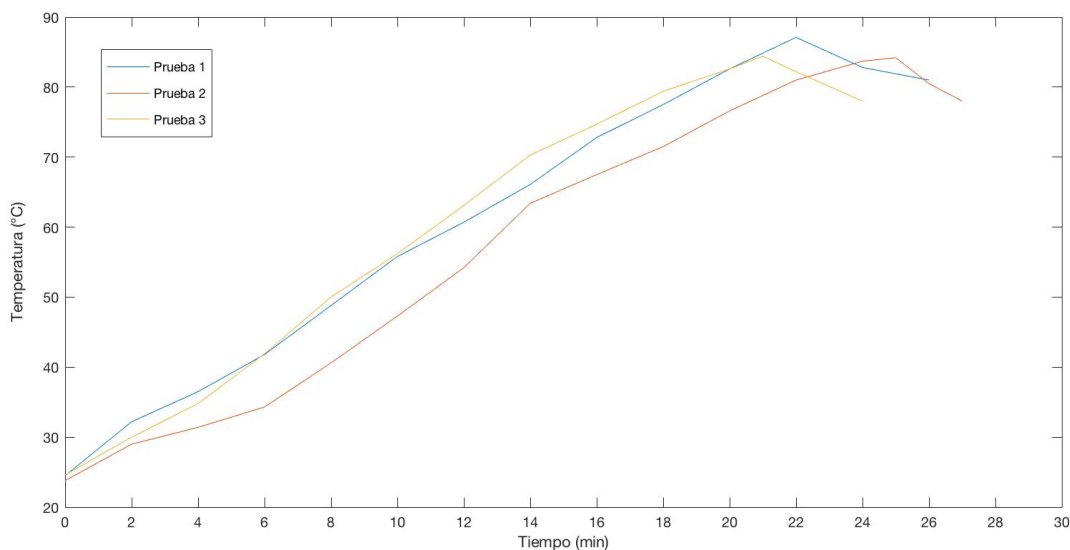


Fig. 4.5. Perfil de temperaturas de las astillas



A continuación se muestran los datos de consumos de todas las pruebas con astillas, donde se encuentra la cantidad de combustible consumido en cada prueba, el total de agua evaporada y el consumo específico.

TABLA 4.4. CONSUMOS EN LAS PRUEBAS CON ASTILLAS

N° Prueba	Consumo combustible (g)	Agua evaporada (g)	Consumo específico (SC)
1	410	100	4,1
2	406	84	4,8
3	418	106	3,9
MEDIA	411,3	96,7	4,3

Los consumos de combustible y de agua evaporada difieren entre las diferentes pruebas de forma homogénea como se puede apreciar. La segunda prueba se mostró ligeramente menos eficiente en el consumo de combustible y por tanto menos capaz de evaporar igual cantidad de agua que las otras pruebas. Aún así, la diferencia no es muy pronunciada entre las pruebas, por lo que se pueden considerar estables.

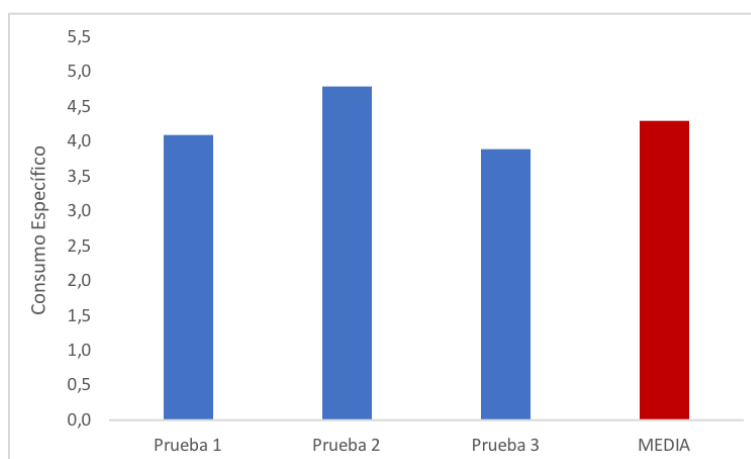


Fig. 4.6. Consumo específico de las astillas

En la Fig. 4.6 se puede ver el mayor consumo específico en la segunda prueba. El consumo específico medio de las astillas es finalmente de 4,3 siendo el mayor de los cuatro combustibles como se verá a continuación.

### 4.3. Tecata

En el caso de la tecata, se llevó a cabo el mismo proceso de secado previo que para las astillas. La siguiente tabla resumen los parámetros característicos de las pruebas con dicho combustible.

TABLA 4.5. PRUEBAS CON TECATA

Nº Prueba	T <sup>a</sup> ambiente (°C)	T <sup>a</sup> inicial del agua (°C)	Tiempo total (min)	T <sup>a</sup> máxima (°C)
1	15,1	26,4	21	85,9
2	15,7	25,5	25	87,9
3	14,9	25,5	30	80,0
MEDIA	15,2	25,8	25,3	84,6

Como se puede comprobar, en esta nueva serie de pruebas se recrearon unas condiciones iniciales muy similares a las de las pruebas con astillas, con una temperatura ambiente media de 15,2 °C y una temperatura inicial del agua de 25,8 °C. Los tiempos totales de cada prueba se mantuvieron en un rango similar a las demás. La duración media de las pruebas con tecata fue de 25,3 minutos, de los cuales 21,3 corresponden a la fase de alta potencia (84,2 %). Al igual que en las pruebas con astillas, la fase de alta potencia representa más del 80 % del tiempo de la prueba, teniendo posteriormente un enfriamiento rápido.

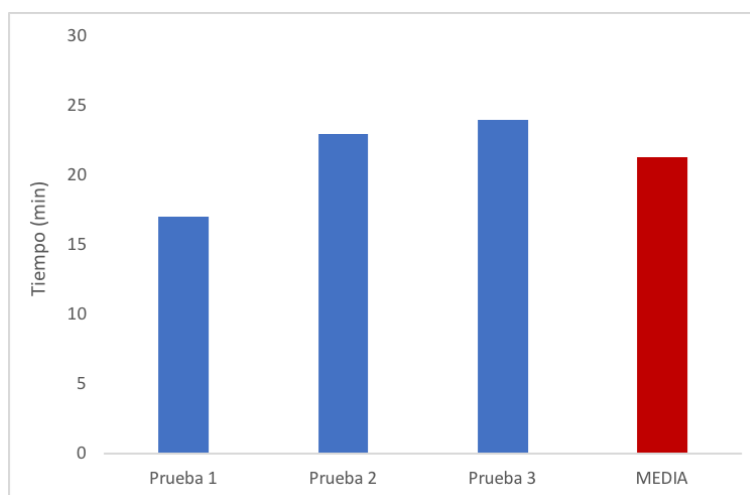


Fig. 4.7. Duración de la fase de alta potencia en las pruebas con tecata

En el perfil de temperaturas que se muestra en la Fig. 4.8, se puede ver que la tercera prueba mostró una fase de enfriamiento más lenta que las otras. Sin embargo, la fase de alta potencia constituye en esa prueba el 80 % del tiempo total. La temperatura máxima que alcanzó este combustible fue de 87,9 °C, lograda en la segunda prueba. Se puede

constatar que la tecata es un combustible de capacidad calorífica similar a las astillas, alcanzando altas temperaturas pero sin llegar a la ebullición. La temperatura media de todas las pruebas fue de 84,6 °C.

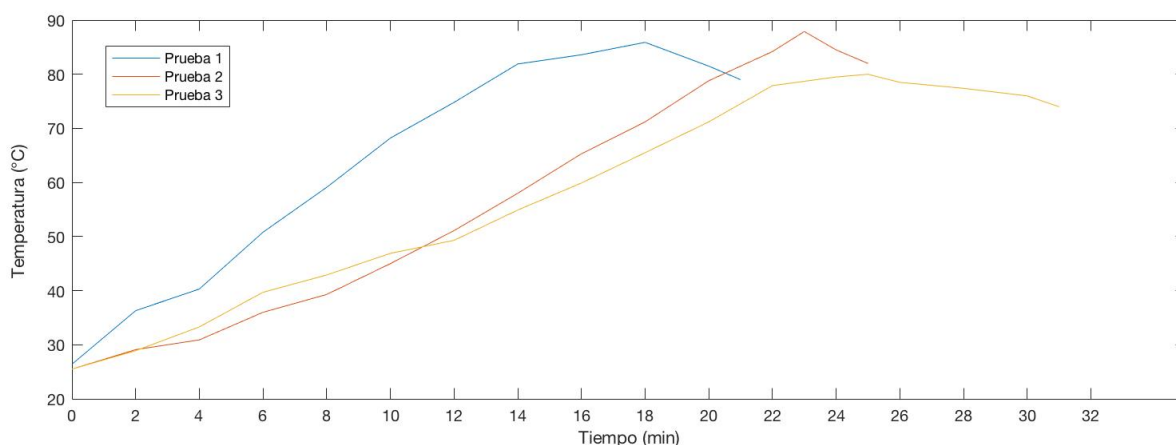


Fig. 4.8. Perfil de temperaturas de la Tecata

Los diferentes consumos tanto de combustible como de agua evaporada están representados en la siguiente tabla, donde el consumo específico ha sido calculado utilizando la expresión (4.1).

TABLA 4.6. CONSUMOS EN LAS PRUEBAS CON TECATA

Nº Prueba	Consumo combustible (g)	Agua evaporada (g)	Consumo específico (SC)
1	418	104	4,0
2	400	88	4,5
3	468	160	2,9
MEDIA	428,7	117,3	3,8

Se puede ver aquí una gran diferencia en el consumo de combustible entre la segunda y la tercera prueba, lo que se refleja también en la cantidad de agua consumida. Esta diferencia puede deberse a múltiples factores, tales como la diferencia de casi un grado de la temperatura ambiente inicial, problemas en el inicio de la llama debido a una mala mezcla del iniciador con el alcohol, etc. La Fig. 4.9 refleja estas diferencias en los consumos específicos de las distintas pruebas, siendo el máximo de 4,5 y el mínimo de 2,9 lo que muestra una media de 3,8 que es algo inferior al consumo específico de las astillas.

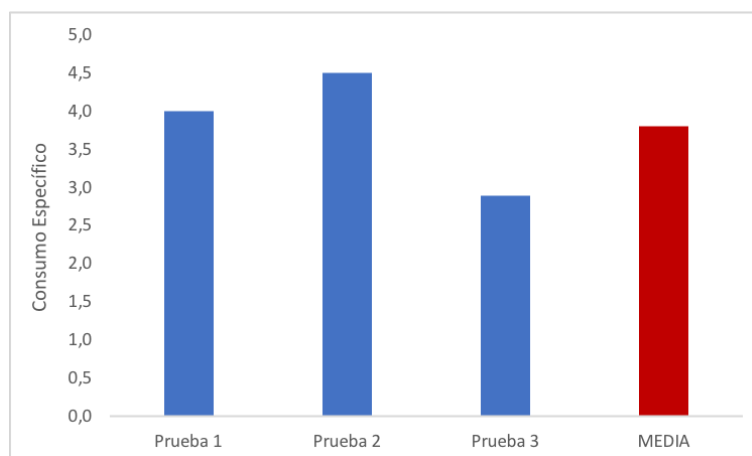


Fig. 4.9. Consumo específico de la tecata

#### 4.4. Pellets: Quercus sin corteza

En el caso de los pellets, no fue necesario un calentamiento previo ya que contienen un 9 % de humedad, lo que está acorde con la norma para llevar a cabo las pruebas. En la TABLA 4.7 se pueden ver los parámetros característicos de las pruebas con el primer tipo de pellets, quercus sin corteza.

TABLA 4.7. PRUEBAS CON PELLETS (QUERCUS SIN CORTEZA)

Nº Prueba	T <sup>a</sup> ambiente (°C)	T <sup>a</sup> inicial del agua (°C)	Tiempo total (min)	T <sup>a</sup> máxima (°C)
1	13,8	24,8	39	93,2
2	14,9	24,8	22	91,9
3	13,0	23,5	33	85,2
MEDIA	13,9	24,4	31,3	90,1

Tal y como se puede observar, las pruebas con el primer tipo de pellets se desarrollaron a temperaturas más bajas que las pruebas con astillas y tecata, siendo la temperatura ambiente media de 13,9 °C. También la temperatura inicial del agua fue ligeramente inferior, siendo la media de 24,4 °C. En la TABLA 4.7 se puede ver la relación de duraciones totales entre las diferentes pruebas, donde se aprecia una duración considerablemente corta en la segunda prueba, que duró únicamente 22 minutos.

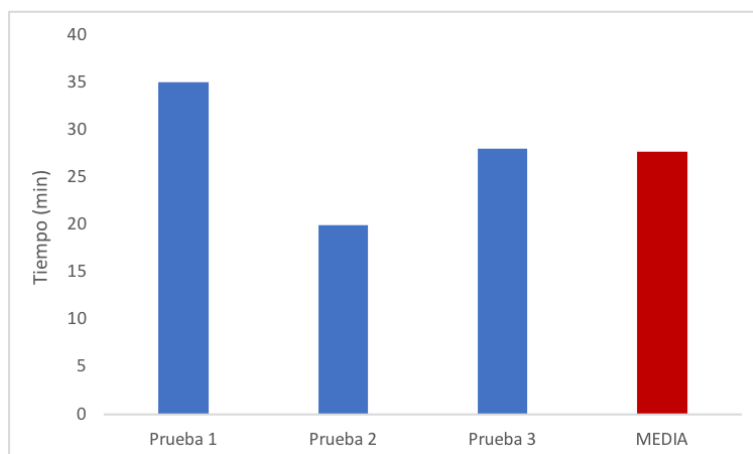


Fig. 4.10. Duración de la fase de alta potencia en las pruebas con Pellets (Quercus sin corteza)

Las otras dos pruebas se mostraron estables por encima de los 30 minutos, alcanzando por tanto una duración media de 31,3 minutos. Los pellets mantuvieron una potencia de llama más duradera que las astillas y la tecata debido a su superior densidad calorífica, alcanzando una duración media de 27,7 minutos en la fase de alta potencia (suponiendo el 88,5 % del total).

En la siguiente figura se puede ver el perfil de temperaturas de las diferentes pruebas:

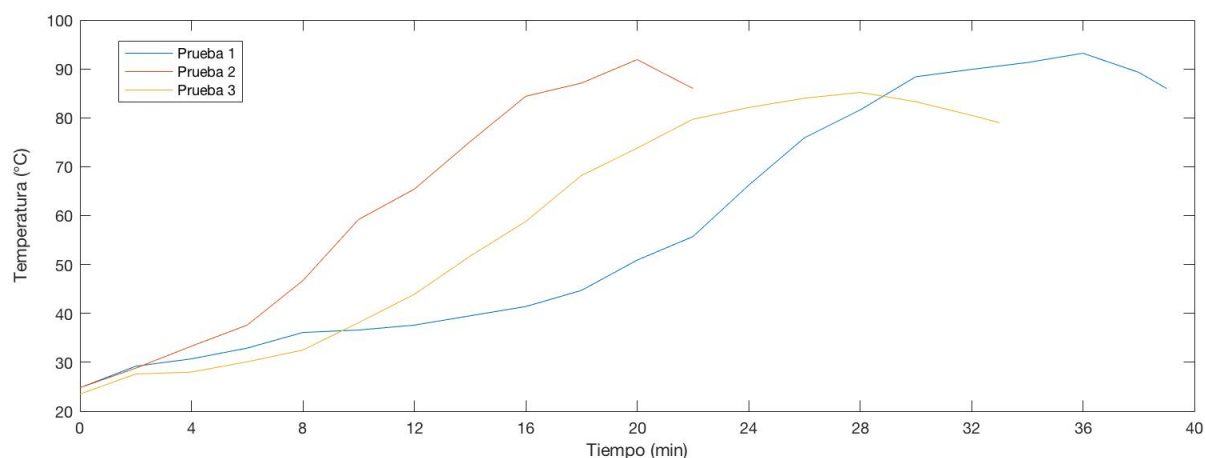


Fig. 4.11. Perfil de temperaturas de los pellets (Quercus sin corteza)

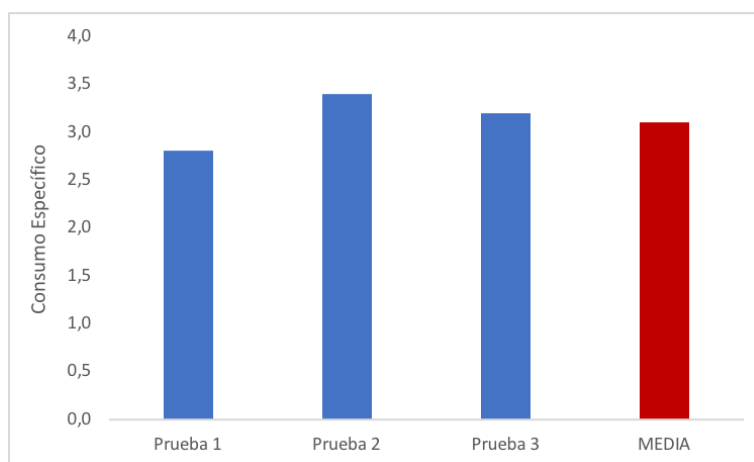
Como se puede comprobar, este tipo de pellets presentaron un comportamiento muy heterogéneo en las diferentes pruebas, mostrando una gran diferencia entre el perfil de la primera prueba y el perfil de la segunda. Esto puede deberse a diversos factores tales como la temperatura ambiente inicial o a diferencias en el mezclado del iniciador con alcohol. Dos de las pruebas alcanzaron la temperatura de ebullición local, mostrándose por tanto muy efectivo como combustible. La tercera prueba, sin embargo, alcanzó únicamente los 85,2 °C, llevando la temperatura media máxima a los 90,1 °C.

En la siguiente tabla se puede ver una comparación de los diferentes consumos en las tres pruebas:

**TABLA 4.8. CONSUMOS EN LAS PRUEBAS CON PELLETS  
(QUERCUS SIN CORTEZA)**

<b>Nº Prueba</b>	<b>Consumo combustible (g)</b>	<b>Agua evaporada (g)</b>	<b>Consumo específico (SC)</b>
1	436	156	2,8
2	424	126	3,4
3	442	140	3,2
<b>MEDIA</b>	<b>434</b>	<b>140,7</b>	<b>3,1</b>

Los diferentes consumos, tanto el consumo de combustible como el agua total evaporada, se muestran muy homogéneos en las diferentes pruebas. Se puede apreciar también que son superiores a los consumos generales tanto de la tecata como de las astillas, siendo el consumo medio de combustible de 434 g y la cantidad media de agua evaporada de 140,7 g.



**Fig. 4.12. Consumo específico de los pellets (Quercus sin corteza)**

El consumo específico, que se ha obtenido de la ecuación (4.1), se mostró también muy homogéneo en las tres pruebas como se puede apreciar en la Fig. 4.12. El consumo específico medio de este primer tipo de pellet es de 3,1 siendo inferior al de los otros dos combustibles analizados con anterioridad.

#### 4.5. Pellets: Tascate con corteza

Al igual que con el primer tipo de pellets, tampoco fue necesario un calentamiento previo en este caso debido a un óptimo componente de humedad en los mismos. Las pruebas con los pellets hechos de táscate con corteza se realizaron con las siguientes condiciones:

TABLA 4.9. PRUEBAS CON PELLETS (TÁSCATAE CON CORTEZA)

Nº Prueba	T <sup>a</sup> ambiente (°C)	T <sup>a</sup> inicial del agua (°C)	Tiempo total (min)	T <sup>a</sup> máxima (°C)
1	18,9	25,4	29	92,5
2	12,4	27,0	30	95,3
3	13,0	23,8	31	95,2
MEDIA	14,8	25,4	30,0	94,3

Las condiciones medias iniciales comprenden una temperatura ambiente de 14,8 °C y una temperatura inicial del agua de 25,4 °C. Se puede apreciar también gran homogeneidad en la duración total de las pruebas, la cual osciló entorno a los 30 minutos.

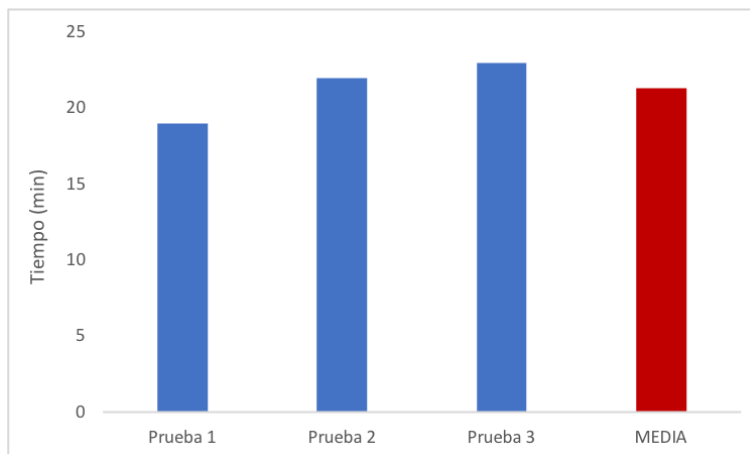


Fig. 4.13. Duración de la fase de alta potencia en las pruebas con Pellets (Táscate con corteza)

La duración media de la fase de alta potencia utilizando este combustible es de 21,3 minutos, que constituye el 71 % del tiempo. Este es el combustible que menor tiempo dedica en la fase de alta potencia, por lo que alcanza el punto de ebullición antes que los demás.

En la Fig. 4.14 se puede ver el perfil de temperaturas de este tipo de pellets. Se puede apreciar cómo todas las pruebas sobrepasaron el punto de ebullición en un corto espacio de tiempo, siendo las tres pruebas muy homogéneas. Se trata del único combustible que superó la temperatura de ebullición en las tres pruebas y además en un corto lapso de tiempo.

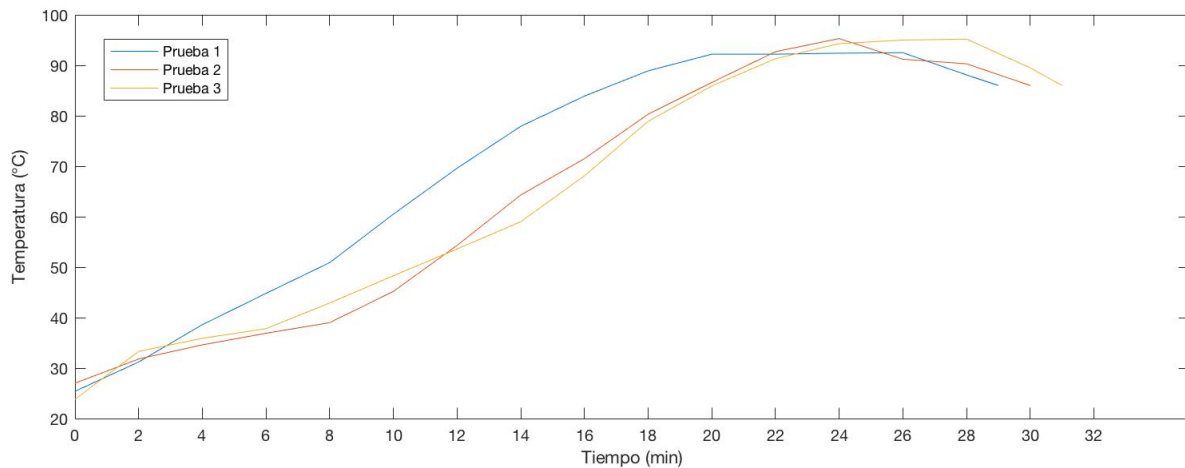


Fig. 4.14. Perfil de temperaturas de los pellets (Táscate con corteza)

La siguiente tabla muestra los consumos de las tres pruebas con este tipo de pellet, donde se puede apreciar su alta tasa de consumo.

TABLA 4.10. CONSUMOS EN LAS PRUEBAS CON PELLETS  
(TÁSCATE CON CORTEZA)

Nº Prueba	Consumo combustible (g)	Agua evaporada (g)	Consumo específico (SC)
1	404	226	1,8
2	414	172	2,4
3	420	142	3,0
MEDIA	412,7	180,0	2,4



Como se puede comprobar, los pellets con corteza son, junto con las astillas, el material que menos combustible ha consumido durante las pruebas, con solo 412,7 g de media. Sin embargo, ha sido el combustible que más cantidad de agua ha logrado evaporar (180 g). Esto se puede observar en la Fig. 4.15, donde se aprecia un consumo específico significativamente inferior a los otros combustibles utilizados (2,4 de media). Es destacable sin embargo la diferencia significativa entre el consumo específico de la primera prueba y el de la tercera prueba, siendo éste de casi el doble.

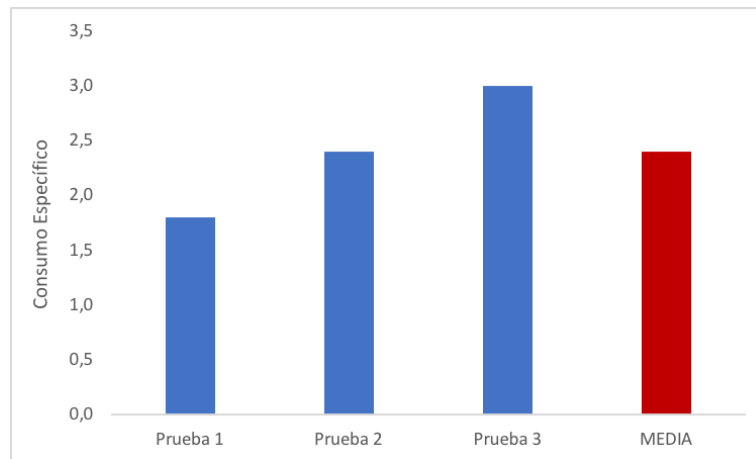


Fig. 4.15. Consumo específico de los pellets (Táscate con corteza)

En el apartado de resultados se analizarán las diferencias significativas entre los diferentes combustibles así como su rendimiento en el dispositivo.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Astillas

La siguiente tabla resume los parámetros en las tres pruebas recogidas utilizando astillas como combustibles:

TABLA 5.1. RESULTADOS ASTILLAS

Nº Prueba	Tasa de Quemado (g/min)	Potencia (kW)	Eficiencia Térmica (%)
1	15,8	5,43	5,75
2	15,0	5,14	5,31
3	17,4	6,00	5,67
MEDIA	16,1	5,53	5,58

Como se puede apreciar, las tres pruebas arrojaron resultados similares, por lo que se puede analizar el rendimiento de las astillas de forma estable. La tasa de quemado medio obtenida fue de 16,1 g/min alcanzando su máxima en la tercera prueba. Precisamente fue esta prueba la que arrojó la mayor potencia empleada (6kW), obteniéndose una potencia media de 5,53 kW. Finalmente, la mayor eficiencia térmica se consiguió en la primera prueba (5,75 %), la cuál no difiere mucho de la eficiencia media, que es de 5,58 %. En la Fig. 5.1 se pueden encontrar estos datos de forma ordenada y más visual.

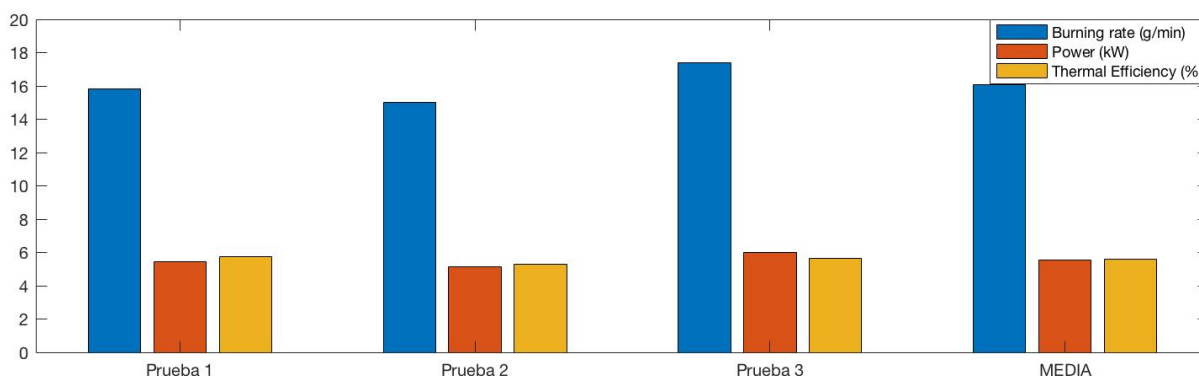


Fig. 5.1. Resultados Astillas

## 5.2. Tecata

Los resultados obtenidos de las pruebas con tecata se muestran a continuación:

TABLA 5.2. RESULTADOS TECATA

N° Prueba	Tasa de Quemado (g/min)	Potencia (kW)	Eficiencia Térmica (%)
1	19,9	6,21	6,19
2	16,0	5,02	6,10
3	15,6	4,85	6,75
MEDIA	17,2	5,36	6,35

Como se puede observar, las tres pruebas muestran resultados muy similares en cuanto a la eficiencia, obteniéndose una eficiencia media de 6,35 %. En cuanto a la tasa de quemado, hay una diferencia considerable entre la primera prueba (19,9 g/min) y la segunda prueba (15,6 g/min), lo que se ve reflejado también en la diferencia de potencias. Como se puede ver en la Fig. 4.5, esto está relacionado con la diferencia de duración entre las pruebas, teniendo una duración más corta aquella prueba en la que mayor potencia se empleó (6,21 kW).

En la siguiente figura se pueden apreciar dichas diferencias de forma clara:

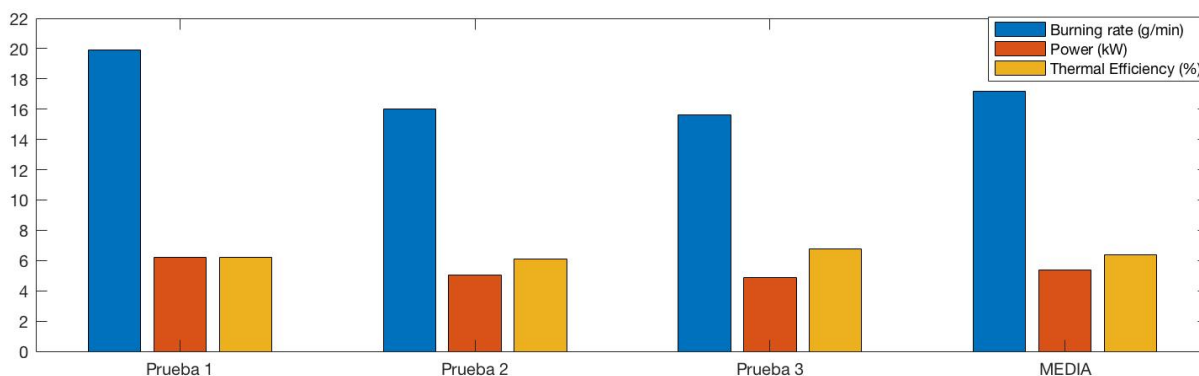


Fig. 5.2. Resultados Tecata

### 5.3. Pellets: Quercus sin corteza

En la siguiente tabla se reflejan los resultados obtenidos de las pruebas con pellets sin corteza:

TABLA 5.3. RESULTADOS PELLETS (QUERCUS SIN CORTEZA)

Nº Prueba	Tasa de Quemado (g/min)	Potencia (kW)	Eficiencia Térmica (%)
1	11,2	4,14	7,17
2	19,3	7,16	6,51
3	13,4	4,95	6,37
MEDIA	14,6	5,42	6,69

Se puede ver una diferencia amplia en la segunda prueba con unas elevadas cifras tanto en la tasa de quemado (19,3 g/min) como en la potencia (7,16 kW). La diferencia de potencia entre la primera prueba y la segunda casi alcanza los 3kW, factor que guarda también una estrecha relación con la duración de ambas pruebas, como se puede ver en la Fig. 4.8.

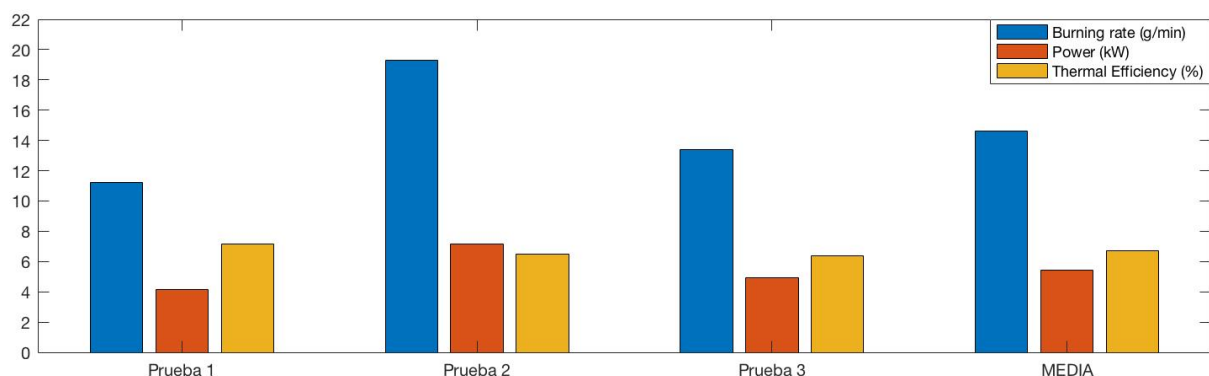


Fig. 5.3. Resultados Pellets (Quercus sin corteza)

En la Fig. 5.3 se puede apreciar la diferencia clara en la tasa de quemado entre las pruebas. Con respecto a la eficiencia térmica, los resultados muestran cierta homogeneidad entre las diferentes pruebas, siendo la media de 6,69 %.

#### 5.4. Pellets: Tascate con corteza

En la TABLA 5.4 se observan los resultados producto de las pruebas con pellets con corteza:

TABLA 5.4. RESULTADOS PELLETS (TÁSCATE CON CORTEZA)

Nº Prueba	Tasa de Quemado (g/min)	Potencia (kW)	Eficiencia Térmica ( %)
1	13,9	5,59	8,85
2	13,8	5,53	7,38
3	13,5	5,42	6,69
MEDIA	13,7	5,5	7,64

Se puede comprobar que los pellets con corteza se muestran constantes en las pruebas, obteniéndose unos resultados muy homogéneos. Así, la tasa de quemado media se sitúa en 13,7 g/min y la potencia media es de 5,5 kW.

En la Fig. 5.4 se puede apreciar una diferencia considerable entre la eficiencia térmica de las distintas pruebas pese a ser el resto de datos muy homogéneos, siendo finalmente la media de éstas del 7,64 %.

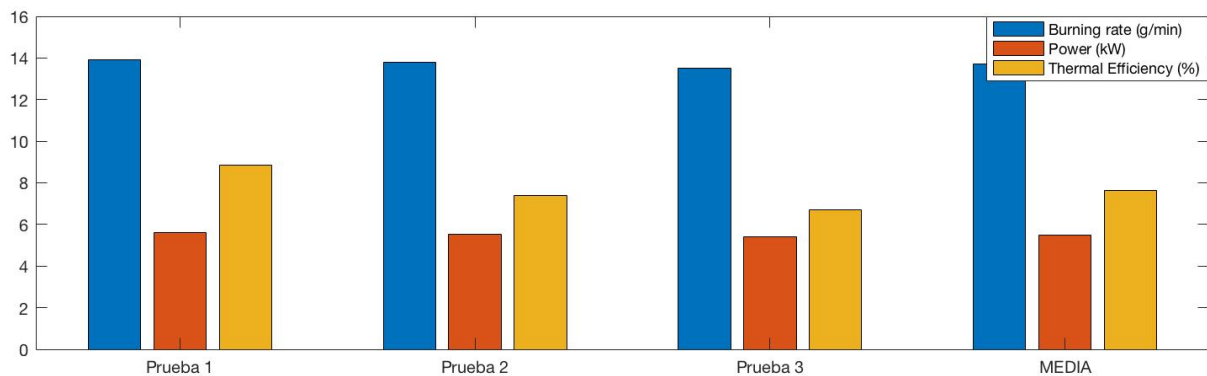


Fig. 5.4. Resultados Pellets (Táscate con corteza)

## 5.5. Comparativa de resultados

En este apartado se llevará a cabo la comparativa final de los resultados entre los distintos combustibles utilizados y se hará una valoración del dispositivo adaptado.

En la TABLA 5.5 se muestran los valores promedio de los distintos combustibles comparados unos con otros:

TABLA 5.5. RESULTADOS FINALES

Combustible	Tasa de Quemado (g/min)	Potencia (kW)	Eficiencia Térmica (%)
Astillas	16,1	5,53	5,58
Tecata	17,2	5,36	6,35
Pellets nº 1	14,6	5,42	6,69
Pellets nº 2	13,7	5,5	7,64

Se puede apreciar una notable diferencia en la tasa de quemado entre los pellets, que tienen una baja tasa de quemado, y los otros combustibles. Se comprueba por tanto que la mejor compactación del material, y por tanto la mayor densidad del mismo, se traduce en una menor tasa de quemado y a su vez en una mayor eficiencia térmica. Así pues, los pellets con corteza se mostraron más eficientes (7,64 %) que los pellets sin corteza (6,69 %), siendo sus eficiencias muy superiores a la de las astillas (5,58 %) que se mostró el combustible menos eficiente de los cuatro.

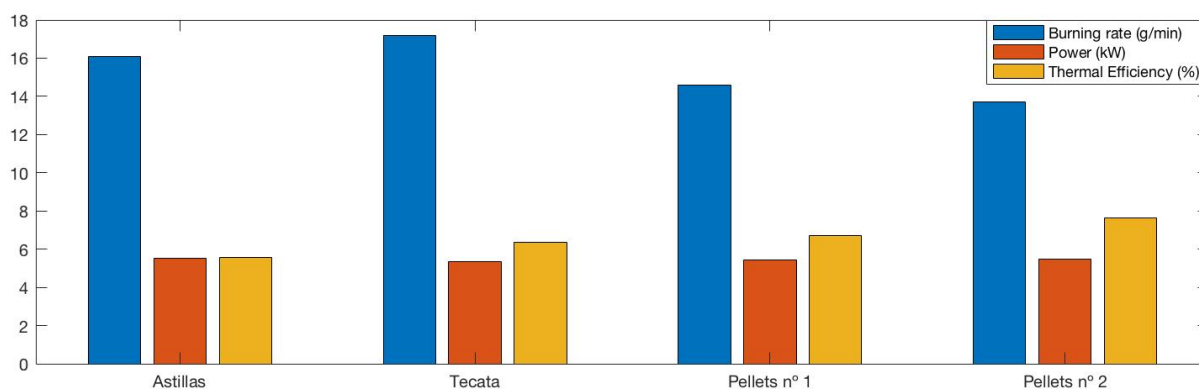


Fig. 5.5. Resultados Finales

En la Fig. 5.5 se puede ver que todos los combustibles desarrollaron una potencia muy similar en torno a los 5 kW. Si lo comparamos con la potencia desarrollada por la estufa Patsari para evaporar agua (Fig. 2.3) vemos que la patsari emplea una potencia de alrededor de 8 kW, algo superior a la empleada por el gasificador.

## 6. CONCLUSIONES

En cuanto a la eficiencia térmica, el fogón de tres piedras tradicional y la estufa Patsari mostraron en este estudio de Berrueta et al. [40] unas eficiencias de 13 % y 7 % respectivamente para las fases de alta potencia en el WBT. Se puede comprobar que el micro gasificador se mantiene aún alejado de la eficiencia de un fogón. Sin embargo, alcanza eficiencias similares a las de la estufa Patsari, por lo que puede considerarse una opción viable de complemento a dicha estufa.

Así pues, se concluye el estudio confirmándose la hipótesis de que el micro gasificador de tiro natural puede ser una adaptación positiva para la estufa Patsari, ya que alcanza eficiencias similares y dota a la estufa de una mayor versatilidad de cara a realizar diversas tareas de cocinado simultáneamente. Complementariamente a dicha hipótesis, se comprueba que los pellets con corteza son el mejor biocombustible sólido para emplear en el dispositivo que se ha estudiado, ya que alcanzan eficiencias térmicas superiores al 7 %. Las astillas de encino se han mostrado como el combustible menos eficiente, alcanzando una eficiencia promedio de 5,58 %.

La aplicación por tanto de este dispositivo al uso en las comunidades rurales está sujeto aún a la aprobación de los propios usuarios. Si bien el rendimiento energético que desempeña el gasificador con los pellets es suficiente para las labores que desempeña la estufa Patsari, es cierto que la utilización de pellets como combustible no está al alcance de todas las familias debido a su costo. Sin embargo, las astillas, pese a no ser tan eficientes, pueden servir como combustible para tareas complementarias menores.

## 7. ANÁLISIS ECONÓMICO

En un estudio de Frapolli et al. [34] se llevó a cabo un exhaustivo análisis económico de la estufa Patsari en el que se reflejaron unos costes directos en la fabricación de la estufa de 83,3\$ (dólares americanos). De éstos, 29,7\$ equivalían a los costes por la mano de obra, mientras que los restantes 53,6\$ conformaban los costes de los materiales. En el mismo estudio se hizo una valoración de los costes indirectos en la fabricación de la estufa Patsari, los cuales constituían 25,3\$ por cada estufa. Esto supone un coste total de cada estufa Patsari de 108,6\$. Tomando el tipo de cambio oficial del dólar estadounidense a 0,89€, se obtiene un coste total de la estufa Patsari de 96,65€.

La versión final del micro gasificador tuvo un coste total de 600 pesos mexicanos. Aplicando una tasa de cambio oficial de 0,046€ por peso mexicano se obtiene un precio final del dispositivo de 27,6€.

El salario estándar de un técnico del laboratorio de bioenergía es de 13200 pesos mexicanos mensuales por un trabajo de 40 horas a la semana. Esto significa que la hora se paga a 82,5 pesos. Aplicando la tasa de cambio se obtiene un salario de 3,8€ por hora. La cantidad de horas empleadas en el proyecto se han aproximado y plasmado en la siguiente tabla:

TABLA 7.1. HORAS EMPLEADAS POR LOS TÉCNICOS

Tarea	Nº de horas	Coste
Remodelación de la estufa	2	7,6€
Secado del combustible	9	34,2€
Determinación del poder calorífico	2	7,6€
Pruebas piloto	3,5	13,3€
Pruebas finales	6,62	25,14€
TOTAL	23,12	87,86€

Como se puede apreciar, el coste total de la mano de obra en el proyecto asciende a 87,86€, aunque es necesario recalcar que estos tiempos son estimaciones. El secado del combustible se ha llevado a cabo durante 9 horas, si bien es cierto que durante ese tiempo los técnicos pueden realizar otras labores mientras controlan periódicamente el horno de secado. Tampoco se ha tenido en cuenta el tiempo de formación de los técnicos para llevar a cabo las pruebas.



Para analizar el coste del combustible se obviarán tanto las astillas como la tecata, ya que ambos constituyen materia prima obtenida por los propios técnicos del laboratorio y por tanto su impacto es muy reducido y poco representativo. Se hará hincapié en el estudio económico de los pellets ya que se mostraron como el combustible más eficiente para el dispositivo y ya que constituyen el tipo de combustible que económicamente suscita más interrogantes debido a su elevado costo de producción. Para ello se utilizará como guía el estudio de tesis del Dr Tauro [41] donde realiza una comparativa de diversos escenarios con distintas materias primas. El coste medio total obtenido en el estudio de la producción de pellets es de 268,68\$ (dólares americanos) por tonelada. Teniendo en cuenta que en las pruebas se han utilizado un total de 2700 g de pellets, el coste total del combustible sería de 0,73\$. Tomando el mismo tipo de cambio utilizado anteriormente se obtendría un coste total de los pellets de 0,65€.

Finalmente, el coste total del proyecto se plasma en la TABLA 7.2, donde se puede ver que el mayor peso del proyecto pertenece a la construcción de la estufa Patsari, ya que es el elemento más complejo. El micro gasificador se ha mostrado un dispositivo económicamente asequible debido a su bajo precio de producción y al reducido precio del combustible necesario.

TABLA 7.2. COSTES TOTALES

Estufa Patsari	96,65€
Micro Gasificador	27,6€
Combustible	0,65€
Mano de obra	87,86€
<b>TOTAL</b>	<b>212,76€</b>

## 8. RECOMENDACIONES

A continuación se realizarán una serie de recomendaciones y observaciones de cara a continuar esta línea de investigación. De esta forma, los siguientes parámetros detallan acciones importantes que han quedado fuera de esta investigación por falta de tiempo y medios:

- *Cambio de variable de llenado:*

En este estudio se utilizó como constante para el llenado del dispositivo la masa total del biocombustible (450 g del combustible a estudiar y 50 g de iniciador), sin embargo, debido a la diferencia de densidades entre los diferentes combustibles, el volumen del dispositivo no se optimizó para los pellets, ocupando éstos únicamente la mitad del gasificador. Por ello se hace necesario un análisis del dispositivo manteniendo constante el volumen de llenado, lo que supondría mayor masa combustible en el caso de los pellets.

- *Análisis económico de los combustibles:*

Al tener dos escenarios en los que puede variar la masa del combustible o el volumen de llenado del dispositivo, se presenta interesante la realización de un análisis económico de ambos modelos para establecer la rentabilidad de la adaptación del gasificador a la estufa en función del combustible a utilizar.

- *Emisiones del micro gasificador:*

Este proyecto ha obviado la eficiencia del dispositivo en sus emisiones, algo que es un factor de gran importancia a la hora de analizar la rentabilidad de la adaptación del dispositivo a la estufa de leña. Se estima que al ser un micro gasificador, se produzca una combustión más eficiente en su interior, lo que mejoraría las emisiones con respecto a las de una estufa convencional. Este análisis dependerá también de varios factores como el tipo de test a realizar o los biocombustibles utilizados, por lo que es materia para otra investigación en profundidad.

- *Evaluación de uso y aceptación de la tecnología:*

Finalmente, para adaptar esta tecnología a las comunidades rurales, se hace imprescindible una evaluación del impacto y de la aceptación de los usuarios, algo fundamental de cara a desarrollar este tipo de ecotecnia, que tiene como objetivo no solo la reducción de emisiones contaminantes para el medio ambiente, sino la de mejorar la calidad de vida de los usuarios.

## **Anexos**

A. ANEXO I: HOJA TÉCNICA (PRUEBAS PILOTO)

A.1. Prueba Astillas (Primera Fase)

Basic Test Data									
Air Temperature	<input type="text" value="19.0"/>	Ce	Name of Tester(s)		<input type="text" value="OLMO F."/>				
Fuel Dimensions	<input type="text"/>	cm	Date		<input type="text" value="21/9/18"/>				
Gross Calorific Value	<input type="text" value="18400"/>	kJ/kg	Stove		<input type="text" value="Patsari+Gas."/>				
Moisture Content	<input type="text" value="14"/>	%	Test Number		<input type="text" value="1"/>				
Dry Weight Pot	<input type="text" value="470"/>	grams	Fuel Type		<input type="text" value="Astillas"/>				
Weight of Pellet Soaking Container	<input type="text" value="-"/>	grams	Location		<input type="text" value="LINEB"/>				
Empty weight of Stove	<input type="text" value="1950"/>	grams	Notes						
Local Boiling Point	<input type="text" value="92"/>	Ce	Prueba piloto. Se utilizan 50g de astillas mojadas en alcohol como iniciador.						
HIGH POWER TEST (COLD START)									
Measurements	Units	Start time is when Pot is on stove			Boiling		Finish: when pot temp is 5 deg below boiling		
Time (24 hr format)	hh:mm:ss	data		label	data		label	data	
Water temperature	°C	10:47		t <sub>d</sub>	11:08		t <sub>d'</sub>	11:10	
Weight of Pot + water	g	27.0		T1 <sub>d</sub>	91,9		T1 <sub>d'</sub>	86	
No load battery voltage	V	1470		P1 <sub>d</sub>				1368	
Weight of wood + stove	g	-		B					
Weight of drained pellets + container	g	2250		f <sub>d</sub>					
Weight of charcoal + Stove	g	50						2002	
								C <sub>e</sub>	

A.2. Prueba Carbón (Primera Fase)

Basic Test Data									
Air Temperature	20	°C	Name of Tester(s)				OLMO F.		
Fuel Dimensions		cm	Date				4/10/18		
Gross Calorific Value		kJ/kg	Stove				Patsari+Gas.		
Moisture Content		%	Test Number				1		
Dry Weight Pot	470	grams	Fuel Type				Carbón		
Weight of Pellet Soaking Container	-	grams	Location				LINEB		
Empty weight of Stove	1950	grams	Notes						
Local Boiling Point	92	°C	Prueba piloto. Se utilizan 50g de astillas mojadas en alcohol como iniciador.						
HIGH POWER TEST (COLD START)									
Measurements		Units	Start time is when Pot is on stove				Boiling		Finish: when pot temp is 5 deg below boiling
Time (24 hr format)	hh:mm:ss		data	label		data	label	data	label
Water temperature	°C		11:51	t <sub>d</sub>		13:03	t <sub>d</sub>	13:13	t <sub>d</sub>
Weight of Pot + water	g		25,0	T <sub>1,d</sub>		66,7	T <sub>1,d</sub>	61	T <sub>1,d</sub>
No load battery voltage	V		1470	P <sub>1,d</sub>				1330	P <sub>1,d</sub>
Weight of wood + stove	g		-	B					
Weight of drained pellets + container	g		2250	f <sub>d</sub>					
Weight of charcoal + Stove	g		50					2006	C <sub>c</sub>



A.4. Prueba Tecata (Segunda Fase)

Basic Test Data									
Air Temperature	<input type="text" value="17,5"/>	Cº	Name of Tester(s)		<input type="text" value="OLMO F."/>				
Fuel Dimensions	<input type="text"/>	cm	Date		<input type="text" value="20/10/18"/>				
Gross Calorific Value	<input type="text" value="16300"/>	kJ/kg	Stove		<input type="text" value="Patsari+Gas."/>				
Moisture Content	<input type="text" value="17"/>	%	Test Number		<input type="text" value="1"/>				
Dry Weight Pot	<input type="text" value="470"/>	grams	Fuel Type		<input type="text" value="Tecata"/>				
Weight of Pellet Soaking Container	<input type="text" value="-"/>	grams	Location		<input type="text" value="LINEB"/>				
Empty weight of Stove	<input type="text" value="1950"/>	grams	Notes						
Local Boiling Point	<input type="text" value="92"/>	Cº	Prueba piloto. Se utilizan 50g de astillas mojadas en alcohol como iniciador.						
HIGH POWER TEST (COLD START)									
Measurements		Units	Start time is when Pot is on stove		Boiling		Finish: when pot temp is 5 deg below boiling		
Time (24 hr format)		hh:mm:ss	data	label	data	label	data	label	
Water temperature		ºC	13:05	t <sub>d</sub>	13:24	t <sub>d</sub>	13:32	t <sub>d</sub>	
Weight of Pot + water		g	27,0	T1 <sub>d</sub>	92	T1 <sub>d</sub>	86	T1 <sub>d</sub>	
No load battery voltage		V	1470	P1 <sub>d</sub>			1280	P1 <sub>d</sub>	
Weight of wood + stove		g	-	B					
Weight of drained pellets + container		g	2450	f <sub>d</sub>					
Weight of charcoal + Stove		g	50				2043	C <sub>c</sub>	

## B. ANEXO II: HOJA TÉCNICA (PRUEBAS EXPERIMENTALES)

### B.1. Pruebas Astillas

Basic Test Data									
Air Temperature	<input type="text" value="14,2"/>	°C	Name of Tester(s)		<input type="text" value="OLMO F."/>				
Fuel Dimensions	<input type="text"/>	cm	Date		<input type="text" value="14/11/18"/>				
Gross Calorific Value	<input type="text" value="18400"/>	kJ/kg	Stove		<input type="text" value="Patsari+Gas."/>				
Moisture Content	<input type="text" value="14"/>	%	Test Number		<input type="text" value="1"/>				
Dry Weight Pot	<input type="text" value="470"/>	grams	Fuel Type		<input type="text" value="Astillas"/>				
Weight of Pellet Soaking Container	<input type="text" value="-"/>	grams	Location		<input type="text" value="LINEB"/>				
Empty weight of Stove	<input type="text" value="1950"/>	grams	Notes		Se utilizan 50g de astillas mojadas en alcohol como iniciador.				
Local Boiling Point	<input type="text" value="92"/>	°C							
HIGH POWER TEST (COLD START)									
Measurements		Units	Start time is when Pot is on stove		Boiling		Finish: when pot temp is 5 deg below boiling		
Time (24 hr format)		hh:mm:ss	data	label	data	label	data	label	
Water temperature		°C	12:04	t <sub>d</sub>	12:26	t <sub>cf</sub>	12:30	t <sub>cf</sub>	
Weight of Pot + water		g	24,5	T1 <sub>d</sub>	87,1	T1 <sub>cf</sub>	81	T1 <sub>cf</sub>	
No load battery voltage		V	1470	P1 <sub>d</sub>			1370	P1 <sub>cf</sub>	
Weight of wood + stove		g	-	B					
Weight of drained pellets + container		g	2450	f <sub>d</sub>					
Weight of charcoal + Stove		g	50				2040	C <sub>c</sub>	



Basic Test Data			
Air Temperature	16.4	C°	Name of Tester(s)
Fuel Dimensions		cm	Date
Gross Calorific Value	18400	kJ/kg	Stove
Moisture Content	14	%	Test Number
Dry Weight Pot	470	grams	Fuel Type
Weight of Pellet Soaking Container	-	grams	Location
Empty weight of Stove	1950	grams	Notes
Local Boiling Point	92	C°	Se utilizan 50g de astillas mojadas en alcohol como iniciador.

HIGH POWER TEST (COLD START)							
Measurements	Units	Start time is when Pot is on stove		Boiling		Finish: when pot temp is 5 deg below boiling	
		data	label	data	label	data	label
Time (24 hr format)	hh:mm:ss	16:05	t <sub>d</sub>	16:30	t <sub>d</sub>	16:32	t <sub>d</sub>
Water temperature	°C	23,8	T1 <sub>d</sub>	84,2	T1 <sub>d</sub>	78	T1 <sub>d</sub>
Weight of Pot + water	g	1470	P1 <sub>d</sub>			1386	P1 <sub>d</sub>
No load battery voltage	V	-	B				
Weight of wood + stove	g	2450	f <sub>d</sub>				
Weight of drained pellets + container	g	50					
Weight of charcoal + Stove	g					2044	C <sub>c</sub>

Basic Test Data			
Air Temperature	14,5	Cº	Name of Tester(s)
Fuel Dimensions		cm	Date
Gross Calorific Value	18400	kJ/kg	Stove
Moisture Content	14	%	Test Number
Dry Weight Pot	470	grams	Fuel Type
Weight of Pellet Soaking Container	-	grams	Location
Empty weight of Stove	1950	grams	Notes
Local Boiling Point	92	Cº	Se utilizan 50g de astillas mojadas en alcohol como iniciador.

HIGH POWER TEST (COLD START)							
Measurements	Units	Start time is when Pot is on stove		Boiling		Finish: when pot temp is 5 deg below boiling	
		data	label	data	label	data	label
Time (24 hr format)	hh:mm:ss	12:00	t <sub>d</sub>	12:21	t <sub>d'</sub>	12:24	t <sub>d'</sub>
Water temperature	ºC	24,6	T <sub>1,d</sub>	84,4	T <sub>1,d'</sub>	78	T <sub>1,d'</sub>
Weight of Pot + water	g	1470	P <sub>1,d</sub>			1364	P <sub>1,d'</sub>
No load battery voltage	V	-	B				
Weight of wood + stove	g	2450	f <sub>d</sub>				
Weight of drained pellets + container	g	50					
Weight of charcoal + Stove	g					2032	C <sub>c</sub>

Basic Test Data										
Air Temperature	<input type="text" value="15,1"/>	C°	Name of Tester(s)			<input type="text" value="OLMO F."/>				
Fuel Dimensions	<input type="text"/>	cm	Date			<input type="text" value="14/11/18"/>				
Gross Calorific Value	<input type="text" value="16300"/>	kJ/kg	Stove			<input type="text" value="Patsari+Gas."/>				
Moisture Content	<input type="text" value="17"/>	%	Test Number			<input type="text" value="1"/>				
Dry Weight Pot	<input type="text" value="470"/>	grams	Fuel Type			<input type="text" value="Tecata"/>				
Weight of Pellet Soaking Container	<input type="text" value="-"/>	grams	Location			<input type="text" value="LINEB"/>				
Empty weight of Stove	<input type="text" value="1950"/>	grams	Notes Se utilizan 50g de astillas mojadas en alcohol como iniciador.							
Local Boiling Point	<input type="text" value="92"/>	C°								
HIGH POWER TEST (COLD START)										
		Start time is when Pot is on stove				Boiling		Finish: when pot temp is 5 deg below boiling		
Measurements		Units	data		label	data		label	data	label
Time (24 hr format)	hh:mm:ss		12:39		t <sub>d</sub>	12:56		t <sub>d</sub>	13:00	t <sub>d</sub>
Water temperature	°C		26,4		T <sub>1,d</sub>	85,9		T <sub>1,d</sub>	79	T <sub>1,d</sub>
Weight of Pot + water	g		1470		P <sub>1,d</sub>				1366	P <sub>1,d</sub>
No load battery voltage	V		-		B					
Weight of wood + stove	g		2450		f <sub>d</sub>					
Weight of drained pellets + container	g		50							
Weight of charcoal + Stove	g								2032	C <sub>c</sub>

B.2. Pruebas Tecata

Basic Test Data			
Air Temperature	<input type="text" value="15,7"/> °C	Name of Tester(s)	<input type="text" value="OLMO F."/>
Fuel Dimensions	<input type="text"/>	Date	<input type="text" value="14/11/18"/>
Gross Calorific Value	<input type="text" value="16300"/> kJ/kg	Stove	<input type="text" value="Patsari+Gas."/>
Moisture Content	<input type="text" value="17"/> %	Test Number	<input type="text" value="2"/>
Dry Weight Pot	<input type="text" value="470"/> grams	Fuel Type	<input type="text" value="Tecata"/>
Weight of Pellet Soaking Container	<input type="text" value="-"/> grams	Location	<input type="text" value="LINEB"/>
Empty weight of Stove	<input type="text" value="1950"/> grams	Notes	
Local Boiling Point	<input type="text" value="92"/> °C	Se utilizan 50g de astillas mojadas en alcohol como iniciador.	

HIGH POWER TEST (COLD START)								
Measurements	Units	Start time is when Pot is on stove		Boiling		Finish: when pot temp is 5 deg below boiling		
	Time (24 hr format)	hh:mm:ss	data	label	data	label	data	label
	Water temperature	°C	<input type="text" value="16:43"/>		<input type="text" value="17:06"/>	$t_d$	<input type="text" value="17:08"/>	$t_d$
	Weight of Pot + water	g	<input type="text" value="25,5"/>		<input type="text" value="87,9"/>	$T1_d$	<input type="text" value="82"/>	$T1_d$
	No load battery voltage	V	<input type="text" value="1470"/>			$P1_d$	<input type="text" value="1382"/>	$P1_d$
	Weight of wood + stove	g	<input type="text" value="-"/>			$B$		
	Weight of drained pellets + container	g	<input type="text" value="2450"/>			$f_d$		
	Weight of charcoal + Stove	g	<input type="text" value="50"/>				<input type="text" value="2050"/>	$C_c$

Basic Test Data			
Air Temperature	14,9	Ce	Name of Tester(s)
Fuel Dimensions		cm	Date
Gross Calorific Value	16300	kJ/kg	Stove
Moisture Content	17	%	Test Number
Dry Weight Pot	470	grams	Fuel Type
Weight of Pellet Soaking Container	-	grams	Location
Empty weight of Stove	1950	grams	Notes
Local Boiling Point	92	Ce	Se utilizan 50g de astillas mojadas en alcohol como iniciador.

HIGH POWER TEST (COLD START)							
Measurements	Units	Start time is when Pot is on stove		Boiling		Finish: when pot temp is 5 deg below boiling	
	Time (24 hr format)	hh:mm:ss	data	label	data	label	data
	Water temperature	9C	12:38	t <sub>a</sub>	13:03	t <sub>d</sub>	13:09
	Weight of Pot + water	g	25,5	T1 <sub>d</sub>	80.0	T1 <sub>d</sub>	74
	No load battery voltage	V	1470	P1 <sub>d</sub>			1310
	Weight of wood + stove	g	-	B			
	Weight of drained pellets + container	g	2450	f <sub>a</sub>			
	Weight of charcoal + Stove	g	50				

B.3. Pruebas Pellets (Quercus sin corteza)

Basic Test Data									
Air Temperature	13,8	Cº	Name of Tester(s)			OLMO F.			
Fuel Dimensions		cm	Date			14/11/18			
Gross Calorific Value	20100	kJ/kg	Stove			Patsari+Gas.			
Moisture Content	9	%	Test Number			1			
Dry Weight Pot	470	grams	Fuel Type			Pellets			
Weight of Pellet Soaking Container	-	grams	Location			LINEB			
Empty weight of Stove	1950	grams	Notes Pellets tipo Quercus sin corteza. Se utilizan 50g de astillas mojadas en alcohol como iniciador.						
Local Boiling Point	92	Cº							
HIGH POWER TEST (COLD START)									
		Start time is when Pot is on stove		Boiling		Finish: when pot temp is 5 deg below boiling			
Measurements		Units	data	label	data	label	data	label	
Time (24 hr format)	hh:mm:ss		10:22	t <sub>d</sub>	10:57	t <sub>cf</sub>	11:01	t <sub>cf</sub>	
Water temperature	ºC		24,8	T <sub>1,d</sub>	92	T <sub>1,cf</sub>	86	T <sub>1,cf</sub>	
Weight of Pot + water	g		1470	P <sub>1,d</sub>			1314	P <sub>1,cf</sub>	
No load battery voltage	V		-	B					
Weight of wood + stove	g		2450	f <sub>d</sub>					
Weight of drained pellets + container	g		50						
Weight of charcoal + Stove	g						2014	C <sub>c</sub>	

Basic Test Data			
Air Temperature	<input type="text" value="14,9"/>	°C	Name of Tester(s)
Fuel Dimensions	<input type="text"/>	cm	Date
Gross Calorific Value	<input type="text" value="20100"/>	kJ/kg	Stove
Moisture Content	<input type="text" value="9"/>	%	Test Number
Dry Weight Pot	<input type="text" value="470"/>	grams	Fuel Type
Weight of Pellet Soaking Container	<input type="text" value="-"/>	grams	Location
Empty weight of Stove	<input type="text" value="1950"/>	grams	Notes
Local Boiling Point	<input type="text" value="92"/>	°C	Pellets tipo Quercus sin corteza. Se utilizan 50g de astillas mojadas en alcohol como iniciador.

HIGH POWER TEST (COLD START)							
Measurements	Units	Start time is when Pot is on stove		Boiling		Finish: when pot temp is 5 deg below boiling	
		data	label	data	label	data	label
Time (24 hr format)	hh:mm:ss	13:21	t <sub>d</sub>	13:41	t <sub>cf</sub>	13:43	t <sub>cf</sub>
Water temperature	°C	24,8	T1 <sub>d</sub>	91,9	T1 <sub>cf</sub>	86	T1 <sub>cf</sub>
Weight of Pot + water	g	1470	P1 <sub>d</sub>			1344	P1 <sub>cf</sub>
No load battery voltage	V	-	B				
Weight of wood + stove	g	2450	f <sub>d</sub>				
Weight of drained pellets + container	g	50					
Weight of charcoal + Stove	g					2026	C <sub>c</sub>

Basic Test Data									
Air Temperature	<input type="text" value="13"/>	C°	Name of Tester(s)		<input type="text" value="OLMO F."/>				
Fuel Dimensions	<input type="text"/>	cm	Date		<input type="text" value="15/11/18"/>				
Gross Calorific Value	<input type="text" value="20100"/>	kJ/kg	Stove		<input type="text" value="Patsari+Gas."/>				
Moisture Content	<input type="text" value="9"/>	%	Test Number		<input type="text" value="3"/>				
Dry Weight Pot	<input type="text" value="470"/>	grams	Fuel Type		<input type="text" value="Pellets"/>				
Weight of Pellet Soaking Container	<input type="text" value="-"/>	grams	Location		<input type="text" value="LINEB"/>				
Empty weight of Stove	<input type="text" value="1950"/>	grams	Notes						
Local Boiling Point	<input type="text" value="92"/>	C°	Pellets tipo Quercus sin corteza. Se utilizan 50g de astillas mojadas en alcohol como iniciador.						
HIGH POWER TEST (COLD START)									
		Start time is when Pot is on stove		Boiling		Finish: when pot temp is 5 deg below boiling			
Measurements		Units	data	label	data	label	data	label	
Time (24 hr format)	hh:mm:ss		11:13	t <sub>d</sub>	11:41	t <sub>d</sub>	11:46	t <sub>d</sub>	
Water temperature	°C		23,5	T <sub>1,d</sub>	85,2	T <sub>1,d</sub>	79	T <sub>1,d</sub>	
Weight of Pot + water	g		1470	P <sub>1,d</sub>			1330	P <sub>1,d</sub>	
No load battery voltage	V		-	B					
Weight of wood + stove	g		2450	f <sub>d</sub>					
Weight of drained pellets + container	g		50						
Weight of charcoal + Stove	g						2008	C <sub>c</sub>	





Basic Test Data			
Air Temperature	<input type="text" value="12.4"/>	°C	Name of Tester(s)
Fuel Dimensions	<input type="text"/>	cm	Date
Gross Calorific Value	<input type="text" value="21800"/>	kJ/kg	Stove
Moisture Content	<input type="text" value="9"/>	%	Test Number
Dry Weight Pot	<input type="text" value="470"/>	grams	Fuel Type
Weight of Pellet Soaking Container	<input type="text" value="-"/>	grams	Location
Empty weight of Stove	<input type="text" value="1950"/>	grams	Notes
Local Boiling Point	<input type="text" value="92"/>	°C	Pellets tipo Tásccate con corteza. Se utilizan 50g de astillas mojadas en alcohol como iniciador.

HIGH POWER TEST (COLD START)							
Measurements	Units	Start time is when Pot is on stove		Boiling		Finish: when pot temp is 5 deg below boiling	
	Time (24 hr format)	hh:mm:ss	data	label	data	label	data
	Water temperature	°C	11:19	t <sub>d</sub>	11:41	t <sub>d</sub>	11:49
	Weight of Pot + water	g	27.0	T <sub>1,d</sub>	92	T <sub>1,d</sub>	86
	No load battery voltage	V	1470	P <sub>1,d</sub>			1298
	Weight of wood + stove	g	-	B			
	Weight of drained pellets + container	g	2450	f <sub>d</sub>			
	Weight of charcoal + Stove	g	50				
			2036	C <sub>c</sub>			

Basic Test Data			
Air Temperature	<input type="text" value="13"/> °C	Name of Tester(s)	<input type="text" value="OLMO F."/>
Fuel Dimensions	<input type="text"/>	Date	<input type="text" value="15/11/18"/>
Gross Calorific Value	<input type="text" value="21800"/> kJ/kg	Stove	<input type="text" value="Patsari+Gas."/>
Moisture Content	<input type="text" value="9"/> %	Test Number	<input type="text" value="3"/>
Dry Weight Pot	<input type="text" value="470"/> grams	Fuel Type	<input type="text" value="Pellets"/>
Weight of Pellet Soaking Container	<input type="text" value="-"/> grams	Location	<input type="text" value="LINEB"/>
Empty weight of Stove	<input type="text" value="1950"/> grams	Notes	Pellets tipo Tásbate con corteza. Se utilizan 50g de astillas mojadas en alcohol como iniciador.
Local Boiling Point	<input type="text" value="92"/> °C		

HIGH POWER TEST (COLD START)																											
Measurements	Units	Start time is when Pot is on stove	data	label	Boiling	Finish: when pot temp is 5 deg below boiling																					
							data	label	data	label																	
											t <sub>d</sub>	T1 <sub>d</sub>	t <sub>d</sub>	T1 <sub>d</sub>													
															10:27	23,8	10:50	92									
																			°C	1470	-	2450					
																							g	V	50		
																										No load battery voltage	g
Weight of drained pellets + container	g																										
		Weight of charcoal + Stove	g																								

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] K. Smith, “El uso doméstico de leña en los países en desarrollo y sus repercusiones en la salud,” *Unasylva, Revista internacional de silvicultura e industrias forestales*, vol. 57, no. 224, pp. 41–44, 2006.
- [2] C. Le Quéré, R. M. Andrew, P. Friedlingstein, S. Sitch, J. Hauck, J. Pongratz, P. Pickers, J. I. Korsbakken, G. P. Peters, J. G. Canadell, *et al.*, “Global carbon budget 2018,” *Earth System Science Data*, vol. 10, pp. 2141–2194, 2018.
- [3] I. P. o. C. C. IPCC, “Global warming of 1.5 °c,” tech. rep., IPCC, 2018.
- [4] REN21, “Renewable 2018: Global status report,” tech. rep., Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2018.
- [5] S. de Energía, “Balance nacional de energía 2017,” tech. rep., Dirección General de Planeación e Información Energéticas, 2017.
- [6] BP, “Bp statistical review of world energy 2017,” tech. rep., BP, 2017.
- [7] Roth *et al.*, *Micro-gasification: cooking with gas from dry biomass*. GIZ, 2014.
- [8] C. Boman, A. Nordin, D. Boström, and M. Öhman, “Characterization of inorganic particulate matter from residential combustion of pelletized biomass fuels,” *Energy & Fuels*, vol. 18, no. 2, pp. 338–348, 2004.
- [9] N. MacCarty, D. Ogle, D. Still, T. Bond, and C. Roden, “A laboratory comparison of the global warming impact of five major types of biomass cooking stoves,” *Energy for sustainable development*, vol. 12, no. 2, pp. 56–65, 2008.
- [10] M. P. Kshirsagar and V. R. Kalamkar, “A comprehensive review on biomass cookstoves and a systematic approach for modern cookstove design,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 580–603, 2014.
- [11] A. C. Parra and J. G. Rutiaga, *Biocombustibles Sólidos*. 2016.
- [12] I. E. A. IEA, “World energy outlook 2017,” tech. rep., International Energy Agency, 2017.
- [13] C. Y. Wereko-Brobby and E. B. Hagan, *Biomass conversion and technology*. 1996.
- [14] A. Haines *et al.*, “Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: overview and implications for policy makers,” *The Lancet*, vol. 374, pp. 2104–2114, 2009. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140673609617591>.

- [15] M. Z. Jacobson, “Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols,” *Nature*, vol. 409, pp. 695–697, 2001. <https://www.nature.com/articles/35055518>.
- [16] J. Ludwig *et al.*, “Domestic combustion of biomass fuels in developing countries: A major source of atmospheric pollutants,” *Journal of Atmospheric Chemistry*, vol. 44, no. 1, pp. 23–37, 2003. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1022159910667>.
- [17] D. Lüthi, M. Le Floch, B. Bereiter, T. Blunier, J.-M. Barnola, U. Siegenthaler, D. Raynaud, J. Jouzel, H. Fischer, K. Kawamura, *et al.*, “High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present,” *Nature*, vol. 453, no. 7193, p. 379, 2008.
- [18] B. Bereiter, S. Eggleston, J. Schmitt, C. Nehrbass-Ahles, T. F. Stocker, H. Fischer, S. Kipfstuhl, and J. Chappellaz, “Revision of the epica dome c co2 record from 800 to 600 kyr before present,” *Geophysical Research Letters*, vol. 42, no. 2, pp. 542–549, 2015.
- [19] M. Rios and M. Kaltschmitt, “Bioenergy potential in mexico—status and perspectives on a high spatial distribution,” *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 3, no. 3, pp. 239–254, 2013.
- [20] INECC, “Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero,” tech. rep., Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2015.
- [21] R. Díaz, “Consumo de leña en el sector residencial de México. evolución histórica y emisiones de co2,” Master’s thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2000.
- [22] V. M. Berrueta, M. Serrano-Medrano, C. García-Bustamante, M. Astier, and O. R. Masera, “Promoting sustainable local development of rural communities and mitigating climate change: the case of Mexico’s patsari improved cookstove project,” *Climatic change*, vol. 140, no. 1, pp. 63–77, 2017.
- [23] M. Brauer *et al.*, “Assessment of particulate concentrations from domestic biomass combustion in rural Mexico,” *Environmental Science and Technology*, vol. 30, no. 1, pp. 104–109, 1995. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es9501272>.
- [24] M. Johnson, R. Edwards, A. Ghilardi, V. Berrueta, D. Gillen, C. A. Frenk, and O. Masera, “Quantification of carbon savings from improved biomass cookstove projects,” *Environmental Science & Technology*, vol. 43, no. 7, pp. 2456–2462, 2009.
- [25] E. Salinas Callejas and V. Gasca Quezada, “Los biocombustibles,” *El Cotidiano*, no. 157, 2009.

- [26] R. Tauro, M. Serrano-Medrano, and O. Masera, “Solid biofuels in mexico: a sustainable alternative to satisfy the increasing demand for heat and power,” *Clean Technologies and Environmental Policy*, pp. 1–13, 2018.
- [27] *Química de los materiales lignocelulósicos y su potencial bioenergético*. J. G. Ru-tiaga and A. C. Parra, 1 ed., 2016.
- [28] J. B. Zárate, “La madera como combustible,” *Revista Forestal del Perú*, vol. 14, no. 2, 2016.
- [29] I. Butnar and M. Llop, “Composition of greenhouse gas emissions in spain: an input–output analysis,” *Ecological Economics*, vol. 61, no. 2-3, pp. 388–395, 2007.
- [30] R. Bailis, A. Cowan, V. Berrueta, and O. Masera, “Arresting the killer in the kitchen: the promises and pitfalls of commercializing improved cookstoves,” *World Development*, vol. 37, no. 10, pp. 1694–1705, 2009.
- [31] J. A. O. Moreno, O. R. M. Cerutti, and A. F. F. Gutiérrez, *La ecotecnología en México*. IMAGIA, 2014.
- [32] M. Zuk, L. Rojas, S. Blanco, P. Serrano, J. Cruz, F. Angeles, G. Tzintzun, C. Armen-dariz, R. D. Edwards, M. Johnson, *et al.*, “The impact of improved wood-burning stoves on fine particulate matter concentrations in rural mexican homes,” *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, vol. 17, no. 3, p. 224, 2007.
- [33] M. Johnson, R. Edwards, C. A. Frenk, and O. Masera, “In-field greenhouse gas emissions from cookstoves in rural mexican households,” *Atmospheric Environment*, vol. 42, no. 6, pp. 1206–1222, 2008.
- [34] García-Frapolli *et al.*, “Beyond fuelwood savings: Valuing the economic benefits of introducing improved biomass cookstoves in the purépecha region of mexico,” *Ecological Economics*, vol. 69, no. 12, pp. 2598–2605, 2010.
- [35] Mukunda *et al.*, “Gasifier stoves–science, technology and field outreach,” *Current Science (00113891)*, vol. 98, no. 5, 2010.
- [36] S. Támara and E. Fernando, “Fabricación y evaluación de estufa mejorada de plancha 16” x 24”, con cámara de combustión microgasificadora (t-lud), para comparación con codo rocket,” B.S. thesis, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2012., 2012.
- [37] P. Medina, V. Berrueta, M. Martínez, V. Ruiz, R. Edwards, and O. Masera, “Comparative performance of five mexican plancha-type cookstoves using water boiling tests,” *Development Engineering*, vol. 2, pp. 20–28, 2017.
- [38] Lombardi *et al.*, “Laboratory protocols for testing of improved cooking stoves (icss): A review of state-of-the-art and further developments,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 98, pp. 321–335, 2017.

- [39] Tryner *et al.*, “The effects of fuel type and stove design on emissions and efficiency of natural-draft semi-gasifier biomass cookstoves,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 23, pp. 99–109, 2014.
- [40] V. M. Berrueta, R. D. Edwards, and O. R. Masera, “Energy performance of wood-burning cookstoves in michoacan, mexico,” *Renewable Energy*, vol. 33, no. 5, pp. 859–870, 2008.
- [41] J. Tauro Raúl, “Factibilidad técnica-económica de la producción de pellets con residuos de la industria forestal del estado de veracruz,” 2013.